

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

СЛОВІКОВСЬКИЙ ОЛЕКСІЙ МИКОЛАЙОВИЧ

УДК 621.43:66.04:681.5

ДИСЕРТАЦІЯ

«ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ СУШИЛЬНИМ
АГРЕГАТОМ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ ЦЕМЕНТНИХ СУМІШЕЙ»

Спеціальність 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
Галузь знань 15 – Автоматизація та приладобудування

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії (PhD)

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ Олексій СЛОВІКОВСЬКИЙ
(підпис),

Науковий керівник

д-р тех. наук, професор

Ігор БОЛБОТ

Київ 2026

АНОТАЦІЯ

Словіковський О.М. Інтелектуальна система керування сушильним агрегатом при виробництві цементних сумішей. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 151 – «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології». – Національний університет біоресурсів і природокористування України, Міністерство освіти і науки України, Київ, 2026.

Сучасні вимоги до енергоефективності та автоматизації технологічних процесів у промисловості обумовлюють необхідність розробки інтелектуальних систем керування, зокрема у сфері виробництва цементних сумішей. Сушильні агрегати відіграють ключову роль у даному виробничому процесі, оскільки забезпечують видалення надлишкової вологи з сировини, що безпосередньо впливає на якість кінцевого продукту, продуктивність підприємства та енергетичні витрати.

Традиційні системи керування сушильними агрегатами часто мають обмежені можливості з точки зору адаптації до змінних умов експлуатації. Вони не завжди забезпечують оптимальні режими роботи через запізнювання реакції на коливання температури, вологості сировини та швидкості подачі матеріалу. Недостатня точність керування призводить до перевитрат енергії, зниження якості продукції та підвищення експлуатаційних витрат.

Актуальність праці обумовлена зростаючими вимогами до енергоефективності, надійності та екологічності теплотехнічного обладнання, зокрема газових пальників, які є ключовими елементами у багатьох виробничих і комунальних процесах. Сучасна промисловість стикається з необхідністю зниження витрат енергоресурсів, підвищення продуктивності обладнання та мінімізації шкідливих викидів, таких як оксиди азоту (NO_x), вуглекислий газ (CO_2) та чадний газ (CO). У цьому контексті автоматизація процесів керування газовими пальниками стає пріоритетним завданням, яке

вимагає комплексного підходу, що поєднує точність математичних моделей, ефективність алгоритмів регулювання та інтеграцію сучасних технологій моделювання.

Газові пальники є незамінним компонентом у хімічній, металургійній, будівельній та інших галузях промисловості, а також у системах опалення. Їхня ефективна робота безпосередньо впливає на економічні показники підприємств та екологічну безпеку. Наприклад, у будівельній галузі газові пальники використовуються для виробництва цементу, де процеси горіння значно впливають на якість продукції. Для досягнення максимальної ефективності таких процесів необхідне точне регулювання співвідношення паливо/повітря, температури полум'я, швидкості потоку газу і повітря, а також динаміки горіння.

Крім того, сучасні міжнародні екологічні стандарти ставлять жорсткі вимоги до викидів парникових газів і шкідливих речовин у атмосферу. Зокрема, рівень NO_x у викидах теплотехнічного обладнання не повинен перевищувати 30-40 ppm, що вимагає впровадження систем автоматизації для оптимізації режимів роботи пальників. У цьому аспекті велике значення має використання математичних моделей та імітаційного моделювання, які дозволяють не лише прогнозувати поведінку системи, а й знаходити оптимальні режими роботи, що відповідають вимогам енергозбереження та екологічності.

Актуальність також зумовлена необхідністю адаптації теплотехнічних процесів до змінних умов експлуатації. Традиційні методи керування часто не забезпечують необхідної гнучкості в умовах змінного навантаження, коливань температури або тиску, що може призводити до зниження ефективності та зростання ризику аварійних ситуацій. У цьому контексті розробка адаптивних систем автоматизації, здатних працювати в реальному часі та коригувати режими роботи залежно від зовнішніх факторів, є надзвичайно актуальною.

Інтеграція інтелектуальних алгоритмів керування, таких як адаптивне регулювання температури, вологості та швидкості сушіння, дозволяє

підвищити ефективність процесу. Використання обладнання Schneider Electric, зокрема Modicon, Altivar та Magelis, дає змогу реалізувати комплексну систему автоматизації, яка здатна в режимі реального часу аналізувати параметри процесу та коригувати режими роботи сушильного агрегату відповідно до поточних умов.

Використання сучасних засобів імітаційного моделювання, таких як Ansys Fluent, дозволяє на етапі проєктування визначити оптимальні параметри тепло- та масообмінних процесів у барабанному сушильному агрегаті. Це забезпечує можливість прогнозування впливу різних режимів роботи на якість сушіння та витрати енергії, що критично важливо для оптимізації технологічного процесу.

Актуальність цієї роботи визначається необхідністю розробки адаптивної інтелектуальної системи керування сушильним агрегатом, що дозволить знизити витрати енергії, підвищити стабільність технологічного процесу та покращити якість кінцевої продукції. Це завдання є важливим як для промислових підприємств, так і для енергетичного сектора в цілому, оскільки воно сприяє зниженню витрат ресурсів, підвищенню екологічної безпеки та забезпеченню стійкого розвитку економіки.

Мета дисертаційної роботи полягає в розробці інтелектуальної системи керування сушильним агрегатом, що забезпечує адаптивне регулювання процесу сушіння для підвищення енергоефективності та стабільності технологічного процесу.

Об'єкт дослідження – процес керування сушінням сировини у сушильному агрегаті при виробництві цементних сумішей, зокрема режимами теплообміну, масообміну, регулювання швидкості обертання барабана, температури та вологості матеріалу.

Предмет дослідження – методи, моделі та алгоритми інтелектуального керування технологічними параметрами сушильного агрегату, що забезпечують підвищення енергоефективності та стабільності процесу сушіння.

Наукова новизна отриманих результатів.

Уперше розроблено комплексний підхід до багатofізичного моделювання та оптимізації сушильного агрегату, який дозволяє враховувати взаємозв'язок газодинамічних, теплових та електромеханічних процесів при експлуатації в режимі реального часу.

Уперше розроблено математичну модель системи керування газовим пальником сушильного агрегату з урахуванням динаміки приводів вентиляторів і шибера повітрязабірника, що забезпечує адаптивне регулювання параметрів горіння та процесу сушіння.

Дістало подальшого розвитку використання підходу до моделювання та оптимізації режимів роботи сушильних агрегатів на основі інтеграції математичних моделей, систем автоматизації та засобів імітаційного моделювання для аналізу роботи технологічного обладнання в умовах змінного навантаження та нестационарних режимів роботи.

Дістало подальшого розвитку використання симуляційного моделювання для аналізу роботи приводів і систем керування в умовах змінного навантаження та аварійних ситуацій шляхом створення інтегрованої моделі газового пальника, у якій дані Ansys Fluent про температуру та тиск передаються в Ansys Twin Builder для моделювання реакції системи керування, що дозволяє досліджувати динамічну поведінку системи в реальних умовах експлуатації.

Удосконалено методи автоматичного керування режимами роботи сушильного агрегату шляхом застосування векторного та скалярного керування електроприводами, а також PID-регулювання виконавчих механізмів, що дозволило підвищити точність стабілізації технологічних параметрів та знизити енергоспоживання системи.

Окремі результати дослідження та розробки було впроваджено в навчальний процес підготовки магістрів галузі знань 15 «Автоматизація та приладобудування», за спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-

інтегровані технології» Національного університету біоресурсів і природокористування України.

Основні результати роботи доповідалися й обговорювалися на таких науково-технічних конференціях: I Міжнародна науково-практична конференція «Цифрові технології в енергетиці і автоматичності» присвячена 125-річчю НУБіП України та 90-річчю ННІ енергетики, автоматики і енергозбереження. 2023 р.; II Міжнародна науково-практична конференція «Цифрові технології в енергетиці і автоматичності». 2024 р.; Міжнародна Scopus конференція «Smart Technologies in Urban Engineering». (м. Харків, 9-11 червня 2024 р.); XXXIII Міжнародна науково-практична конференція «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (MicroCAD–2025) (м. Харків, 15-17 травня 2025 р.), дистанційно.

У дисертаційній роботі виконано комплексне дослідження інтелектуальної системи керування сушильним агрегатом при виробництві цементних сумішей, яке включало аналіз існуючих підходів до автоматизації процесів сушіння, теоретичне обґрунтування експлуатаційних режимів, багатофізичне та імітаційне моделювання ключових процесів, а також реалізацію системи керування у сучасних програмних середовищах автоматизації.

Структура і зміст дисертації. Дисертація складається з анотації, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел до кожного з розділів та додатків. Загальний обсяг роботи складає 281 сторінки. Обсяг основного тексту дисертації складає 202 сторінки. Дисертація містить 129 ілюстрацій, 9 таблиць, 6 додатків. До списку використаних джерел увійшло 141 найменувань.

У першому розділі проведено ґрунтовний аналіз сучасних конструкцій газових пальників, їхніх технічних характеристик та областей застосування. Встановлено, що одним із ключових факторів забезпечення стабільної роботи пальника є інтеграція ефективних систем керування, які адаптуються до технологічних умов процесу. Зокрема, проаналізовано засоби керування

режимами роботи пальників, включаючи регулятори витрати палива, повітря та параметрів полум'я. Особливу увагу приділено системам частотного керування, що є критично важливими для регулювання роботи вентиляторів і приводів шибера. Розроблено концепцію прототипу виробничої установки з газовим пальником, яка слугувала основою для подальшого моделювання та оптимізації.

У другому розділі виконано теоретичне обґрунтування експлуатаційних режимів роботи газового пальника. Розроблено математичні моделі процесів газодинаміки, включаючи турбулентність, змішування газів, процеси горіння та теплообміну.

У третьому розділі розроблено імітаційні моделі основних процесів у газовому пальнику з використанням програмного забезпечення Ansys Fluent, Ansys Maxwell та Ansys Twin Builder. У Fluent змодельовано газодинамічні процеси з високим ступенем точності, зокрема розподіл температурних полів, тисків та швидкостей у зоні горіння. У Maxwell виконано електромагнітний аналіз асинхронних двигунів і двигунів із постійними магнітами (BLDC), отримано їхні характеристики, такі як момент, струм та втрати. Ці результати були інтегровані у Twin Builder у вигляді ROM-об'єктів, що забезпечило точне моделювання електромеханічних процесів. У Twin Builder також реалізовано скалярне та векторне керування асинхронними двигунами, а також регулювання швидкості BLDC-двигуна.

У четвертому розділі реалізовано розроблену систему керування в програмних середовищах SoMachine та Vijeo Designer від Schneider Electric. Логіка керування була інтегрована у контролер Schneider M241, а приводи вентиляторів і шибера управлялися через частотні перетворювачі ATV930 та ATV320. Для забезпечення зручності операторської роботи було створено інтуїтивний інтерфейс на основі сенсорної панелі Magelis HMISTU855, який відображав параметри роботи системи, аварійні сигнали та режими керування.

Ключові слова: сушильний агрегат, інтелектуальна система керування, автоматизація, цементні суміші, процес сушіння, адаптивне керування,

багатофізичне моделювання, енергоефективність, газовий пальник, електропривод.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ

Наукові праці, які відображають основні наукові результати дисертації:

1. Pliuhin, V., Zablodskiy, M., Tsegelnyk, Y., & **Slovikovskiy, O.** (2022). Development of Imitation Model of an Electromechanical Energy Converter with a Solid Rotor in ANSYS RMxpert, Maxwell and Twin Builder . Lighting Engineering & Power Engineering, 61(1), 21–29. <https://doi.org/10.33042/2079-424X.2022.61.1.03> *(Pliuhin V. здійснено постановку задачі дослідження, узгодження структури моделі електромеханічного перетворювача енергії, аналіз результатів моделювання та редагування матеріалів статті. Zablodskiy M. виконано моделювання електромеханічних процесів у машинах з масивним ротором та аналіз електромагнітних характеристик. Tsegelnyk Y. здійснено побудову моделей у середовищі Ansys Maxwell та аналіз отриманих характеристик. Словіковським О.М. розроблено імітаційну модель електромеханічного перетворювача енергії з масивним ротором у середовищах Ansys RMxpert, Maxwell та Twin Builder).*
2. Pliuhin, V., **Slovikovskiy, O.**, & Synelnykov, O. (2024). Formation the Robotic Mechanism Digital Twin Structure. Lighting Engineering & Power Engineering, 63(1), 27–34. <https://doi.org/10.33042/2079-424X.2024.63.1.04> *(Pliuhin V. сформовано концепцію роботизованого механізму та узгоджено архітектуру цифрового двійника. Synelnykov O. виконано аналіз структурних елементів роботизованої системи та підготовлено графічні матеріали. Словіковським О.М. розроблено структуру цифрового двійника роботизованого механізму).*
3. Pliuhin, V., Tsegelnyk, Y., & **Slovikovskiy, O.** (2024). Digital Twins of Different Types Electrical Machines. Lighting Engineering & Power Engineering, 63(2), 35–45. <https://doi.org/10.33042/2079-424X.2024.63.2.01> *(Pliuhin V.*

здійснено координацію дослідження, аналіз типів електричних машин та редагування результатів роботи. Tsegelnyk Y. підготовлено параметри моделей електричних машин для середовища Ansys Twin Builder. Словіковським О.М. розроблено моделі цифрових двійників електричних машин різних типів у середовищі Ansys Twin Builder).

4. Sukhonos, M., Pliuhin, V., Tsegelnyk, Y., **Slovikovskiy, O.**, & Varvianska, V. (2022). Development of Electric Drive Control System in SoMachine (Schneider Electric). *Lighting Engineering & Power Engineering*, 61(3), 93–106. <https://doi.org/10.33042/2079-424X.2022.61.3.03> (Sukhonos M. здійснено постановку задачі автоматизованого керування електроприводом та аналіз режимів роботи системи. Pliuhin V. розроблено структуру системи керування та виконано налаштування взаємодії компонентів. Tsegelnyk Y. підготовлено параметри електропривода та проведено аналіз динамічних характеристик. Varvianska V. виконано оформлення матеріалів дослідження та підготовку документації. Словіковським О.М. розроблено модель системи керування електроприводом у середовищі SoMachine та налаштовано параметри ПД-регуляторів).

5. Aksonov, O., Pliuhin, V., Tsegelnyk, Y., **Slovikovskiy, O.**, Duniev, O., & Yehorov, A. (2022). Electric Drive SCADA Development with Vijeo Designer (Schneider Electric). *Lighting Engineering & Power Engineering*, 61(3), 107–121. <https://doi.org/10.33042/2079-424X.2022.61.3.04> (Aksonov O. здійснено постановку задачі диспетчерського керування електроприводом та координацію розробки SCADA-системи. Pliuhin V. сформовано структуру системи керування та інтеграції SCADA-компонентів. Tsegelnyk Y. виконано аналіз параметрів електропривода та тестування режимів роботи системи. Duniev O. реалізовано елементи інтерфейсу операторської панелі. Yehorov A. підготовлено та перевірено програмні компоненти системи диспетчерського керування. Словіковським О.М. розроблено SCADA-систему диспетчерського керування електроприводом у середовищі Vijeo Designer).

6. Bolbot, I., **Slovikovskiy, O.** (2025). Intelligent Optimization Of Gas Burner Operating Modes For Cement Drying Units. (2025). *Lighting Engineering & Power Engineering*, 64(1), 9-15. <https://doi.org/10.33042/2079-424X.2025.64.1.02>

(Bolbot I. здійснено постановку задачі оптимізації режимів роботи газового пальника та аналіз енергоефективності сушильних установок. Словіковським О.М. розроблено алгоритм інтелектуальної оптимізації режимів роботи газового пальника сушильних установок).

7. Bolbot, I., **Slovikovskiy, O.** (2025). Multi-Physics Modeling and Adaptive Control of Gas Burner Systems for Enhanced Energy Efficiency and Emission Reduction in Cement Drying Processes. (2025). *Lighting Engineering & Power Engineering*, 64(2), 51-56. <https://doi.org/10.33042/2079-424X.2025.64.2.01>

(Bolbot I. виконано аналіз мультифізичних процесів у системі газового пальника та оцінку енергоефективності й рівня викидів. Словіковським О.М. розроблено мультифізичну модель та адаптивне керування системою газового пальника для підвищення енергоефективності).

8. Bolbot, I., & **Slovikovskiy, O.** (2025). Mathematical modelling of the gas burner air intake damper drive. *Machinery & Energetics*, 16(3), 48-57. <https://doi.org/10.31548/machinery/3.2025.48> *(Bolbot I. здійснено постановку задачі математичного моделювання привода шиберів та аналіз механічних характеристик системи. Словіковським О.М. розроблено математичну модель електропривода шиберів повітрязбірника газового пальника).*

9. Болбот І.М., **Словіковський О.М.**, Заблудський М.М. Комп'ютерна програма «Оптимізація режиму роботи газового пальника «GAS BURNER OPT». Патент на твір №140037, 13.10.2025, бюл. № 95 від 28.11.2025. <https://iprop-ua.com/cr/dk1mqss6/> *(Болботом І.М. сформовано технічні вимоги до програмного продукту та проведено тестування алгоритму оптимізації. Заблудським М.М. розроблено режими роботи газового обладнання та виконано аналіз результатів роботи програми. Словіковським О.М. здійснено програмну реалізацію алгоритму оптимізації режимів роботи газового пальника «GAS BURNER OPT»).*

10. Болбот І.М., **Словіковський О.М.**, Заблодський М.М. Комп'ютерна програма «Комп'ютерна програма «Моделювання шибери повітрязабірника «FLAP DC»». Патент на твір №140038, 13.10.2025, бюл. № 95 від 28.11.2025. <https://iprop-ua.com/cr/7s59sq0b/> (Болботом І.М. сформовано технічні вимоги до програмної моделі привода шибера та проведено аналіз результатів моделювання. Заблодським М.М. розроблено електромеханічну частину привода та перевірено коректність моделі. Словіковським О.М. розроблено програмну модель привода шибера повітрязабірника «FLAP DC»).

Наукові роботи, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

11. **О.М. Словіковський**, Б.С. Левандовський, В.Є. Плюгін. Сучасні підходи для створення інтегрованих енергетичних систем із розподіленою генерацією. Матеріали IV Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених «Проблеми сучасної електроенергетики, електротехніки та електромеханіки у післявоєнному періоді», 24 листопада 2023 р С. 61-64. <https://ojs.kname.edu.ua/index.php/area/article/view/3266> (Словіковським О.М. проведено аналіз сучасних підходів до створення інтегрованих енергетичних систем із розподіленою генерацією. Левандовським Б.С. виконано аналіз сучасних рішень у сфері розподіленої генерації та підготовлено матеріали щодо інтегрованих енергетичних систем. Плюгіним В.Є. здійснено наукове керівництво).

12. **О.М. Словіковський**, Д.С. Харшев, В.Є. Плюгін. Аналіз технічних та економічних параметрів компонентів сонячної енергетичної системи. Матеріали IV Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених «Проблеми сучасної електроенергетики, електротехніки та електромеханіки у післявоєнному періоді», 24 листопада 2023 р С. 69-72. <https://ojs.kname.edu.ua/index.php/area/article/view/3268> (Словіковським О.М. виконано аналіз технічних та економічних параметрів компонентів сонячних

енергетичних систем. Харшевим Д.С. здійснено збір та аналіз технічних характеристик компонентів сонячної енергетичної системи. Плюгіним В.Є. здійснено наукове керівництво).

13. **О.М. Словіковський**, Жилін А.В., Плюгін В.Є. Розробка системи стабілізації швидкості генератора електростанції при коливанні навантаження / А.В. Жилін, В.Є. Плюгін // Тези доповідей III Всеукраїнської наук.-практ. конф. «Проблеми сучасної електроенергетики, електротехніки та електромеханіки у післявоєнному періоді», 19-21 жовтня 2022 р. – Харків: ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2022, С. 16-17. <https://ojs.kname.edu.ua/index.php/area/article/view/2988> (Словіковським О.М. розроблено алгоритм стабілізації швидкості генератора електростанції при змінному навантаженні. Жиліним А.В. виконано аналіз режимів роботи генератора електростанції. Плюгіним В.Є. здійснено наукове керівництво).

14. Pliuhin, V., Sukhonos, M., **Slovikovskiy, O.**, Dolzhenko, I. (2026). AI-Powered Robotic Mechanisms for Handling Radioactive Materials. In: Arsenyeva, O., Romanova, T., Sukhonos, M., Biletskyi, I., Tsegelnyk, Y. (eds) Smart Technologies in Urban Engineering. STUE 2024. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 1659. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-032-06832-3_21 [Scopus] (Pliuhin V. здійснено постановку задачі застосування штучного інтелекту у роботизованих системах. Sukhonos M. сформовано вимоги до роботизованої системи. Словіковським О.М. розроблено підходи до застосування методів штучного інтелекту для керування роботизованими механізмами. Dolzhenko I. підготовлено та оформлено матеріали публікації).

15. **Словіковський О.М.**, Болбот І.М. Сучасні підходи до автоматизації процесу горіння в газових пальниках промислових сушарок. Харків, тези XXXIII Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» MicroCAD-2025, м. Харків, 14-17 травня 2025 р., с. 113. <https://ndch.kpi.kharkov.ua/wp-content/uploads/2025/05/Zbirnik-tez-2025.pdf> (Словіковським О.М. розроблено підходи до автоматизації процесу горіння газових пальників промислових

сушильних установок. Болботом І.М. виконано аналіз сучасних засобів автоматизації процесу горіння газових пальників та підготовлено матеріали доповіді).

ABSTRACT

Slovikovsky O.M. Intelligent control system for a drying unit in the production of cement mixtures. – Qualification scientific work in the form of a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 151 – “Automation and computer-integrated technologies”. – National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2026.

Modern requirements for energy efficiency and automation of technological processes in industry necessitate the development of intelligent control systems, in particular in the field of cement mixture production. Drying units play a key role in this production process, as they ensure the removal of excess moisture from raw materials, which directly affects the quality of the final product, the productivity of the enterprise and energy costs.

Traditional control systems for drying units often have limited capabilities in terms of adaptation to changing operating conditions. They do not always provide optimal operating modes due to delayed response to fluctuations in temperature, raw material moisture and material feed rate. Insufficient control accuracy leads to excessive energy consumption, reduced product quality and increased operating costs.

The relevance of the work is due to the growing requirements for energy efficiency, reliability and environmental friendliness of heat engineering equipment, in particular gas burners, which are key elements in many production and utility processes. Modern industry is faced with the need to reduce energy consumption, increase equipment productivity and minimize harmful emissions, such as nitrogen oxides (NO_x), carbon dioxide (CO_2) and carbon monoxide (CO). In this context, automation of gas burner control processes is becoming a priority task, requiring an integrated approach that combines the accuracy of mathematical models, the

efficiency of control algorithms and the integration of modern modeling technologies.

Gas burners are an indispensable component in the chemical, metallurgical, construction and other industries, as well as in heating systems. Their effective operation directly affects the economic performance of enterprises and environmental safety. For example, in the construction industry, gas burners are used for cement production, where combustion processes significantly affect product quality. To achieve maximum efficiency of such processes, precise regulation of the fuel/air ratio, flame temperature, gas and air flow rate, and combustion dynamics is necessary.

In addition, modern international environmental standards impose strict requirements on greenhouse gas emissions and harmful substances into the atmosphere. In particular, the level of NO_x in emissions from thermal equipment should not exceed 30-40 ppm, which requires the implementation of automation systems to optimize burner operating modes. In this aspect, the use of mathematical models and simulation modeling is of great importance, which allow not only to predict the behavior of the system, but also to find optimal operating modes that meet the requirements of energy saving and environmental friendliness.

The relevance is also due to the need to adapt thermal processes to changing operating conditions. Traditional control methods often do not provide the necessary flexibility in conditions of variable load, temperature or pressure fluctuations, which can lead to a decrease in efficiency and an increase in the risk of emergency situations. In this context, the development of adaptive automation systems capable of operating in real time and adjusting operating modes depending on external factors is extremely relevant.

The integration of intelligent control algorithms, such as adaptive control of temperature, humidity and drying speed, allows to increase the efficiency of the process. The use of Schneider Electric equipment, in particular Modicon, Altivar and Magelis, allows to implement a comprehensive automation system that is

capable of analyzing process parameters in real time and adjusting the operating modes of the drying unit in accordance with current conditions.

The use of modern simulation tools, such as Ansys Fluent, allows to determine the optimal parameters of heat and mass transfer processes in the drum drying unit at the design stage. This provides the ability to predict the impact of different operating modes on the quality of drying and energy consumption, which is critically important for optimizing the technological process.

The relevance of this work is determined by the need to develop an adaptive intelligent control system for the drying unit, which will reduce energy consumption, increase the stability of the technological process and improve the quality of the final product. This task is important both for industrial enterprises and for the energy sector as a whole, as it contributes to reducing resource consumption, increasing environmental safety and ensuring sustainable economic development.

The purpose of the dissertation is to develop an intelligent control system for a drying unit that provides adaptive regulation of the drying process in order to improve energy efficiency and ensure the stability of the technological process.

The object of research is the process of raw material drying in a drying unit used in the production of cement mixtures, including heat and mass transfer processes, regulation of drum rotational speed, temperature, and material moisture content.

The subject of research is methods, models, and algorithms for intelligent control of the technological parameters of a drying unit that ensure improved energy efficiency and stability of the drying process.

Scientific novelty of the obtained results

For the first time, a comprehensive approach to the multiphysics modeling and optimization of a drying unit has been developed, enabling the consideration of the interrelationships among gas-dynamic, thermal, and electromechanical processes during real-time operation.

For the first time, a mathematical model of the gas burner control system of a drying unit has been developed, taking into account the dynamics of fan drives and the air intake damper drive, thereby ensuring adaptive regulation of combustion and drying process parameters.

The application of an approach to the modeling and optimization of drying unit operating modes based on the integration of mathematical models, automation systems, and simulation tools for analyzing the performance of technological equipment under variable loads and non-stationary operating conditions has been *further developed*.

The use of simulation modeling for the analysis of drive systems and control systems under variable loads and emergency conditions has been *further developed* through the creation of an integrated gas burner model in which temperature and pressure data obtained from ANSYS Fluent are transferred to ANSYS Twin Builder for simulating the control system response, making it possible to investigate the dynamic behavior of the system under real operating conditions.

Methods for automatic control of drying unit operating modes have been *improved* through the application of vector and scalar control strategies for electric drives, as well as PID control of actuating mechanisms, resulting in increased accuracy of technological parameter stabilization and reduced energy consumption of the system.

Some results of the research and development were implemented in the educational process of training masters in the field of knowledge 15 "Automation and Instrumentation ", in the specialty 151 "Automation and computer-integrated technologies ", in the educational program of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine.

The main results of the work were reported and discussed at the following scientific and technical conferences: I International Scientific and Practical Conference "Digital Technologies in Power Engineering and Automation" dedicated to the 125th anniversary of the NUBiP of Ukraine and the 90th anniversary of the National Research Institute of Power Engineering, Automation and Energy Saving.

2023; II International Scientific and Practical Conference "Digital Technologies in Power Engineering and Automation". 2024; International Conference "Smart Technologies in Urban Engineering". (Kharkiv, June 9-11, 2024), XXXIII International Scientific and Practical Conference "Information Technologies: Science, Engineering, Technology, Education, Health" (MicroCAD–2025) (Kharkiv, May 15–17, 2025) remotely.

The dissertation work carried out a comprehensive study of the gas burner control system, which included an analysis of existing approaches, theoretical substantiation of operating modes, simulation modeling of key processes and implementation of the control system in automation software environments.

Structure and content of the dissertation. The dissertation consists of an abstract, introduction, four chapters, conclusions, a list of sources used for each chapter, and appendices. The total volume of the work is 281 pages. The main part volume is 202 pages. The dissertation contains 129 figures, 9 tables and 6 appendices. The list of references includes 141 items.

The first section provides a thorough analysis of modern gas burner designs, their technical characteristics and areas of application. It was established that one of the key factors in ensuring stable burner operation is the integration of effective control systems that adapt to the technological conditions of the process. In particular, the means of controlling burner operating modes were analyzed, including fuel, air flow and flame parameter controllers. Particular attention was paid to frequency control systems, which are critically important for regulating the operation of fans and gate actuators. The concept of a prototype production plant with a gas burner was developed, which served as the basis for further modeling and optimization.

In the second section, the theoretical justification of the operating modes of the gas burner was performed. Mathematical models of gas dynamics processes were developed, including turbulence, gas mixing, combustion processes and heat transfer.

In the third section, simulation models of the main processes in a gas burner were developed using the Ansys Fluent, Ansys Maxwell and Ansys Twin Builder software. Fluent simulated gas-dynamic processes with a high degree of accuracy, including the distribution of temperature fields, pressures and velocities in the combustion zone. Maxwell performed electromagnetic analysis of induction motors and permanent magnet motors (BLDC), obtained their characteristics, such as torque, current and losses. These results were integrated into Twin Builder in the form of ROM objects, which ensured accurate modeling of electromechanical processes. Twin Builder also implemented scalar and vector control of induction motors, as well as speed control of the BLDC motor.

In the fourth section, the developed control system was implemented in the SoMachine and Vijeo Designer software environments from Schneider Electric. The control logic was integrated into the Schneider M241 controller, and the fan and gate drives were controlled via ATV930 and ATV320 frequency converters. To ensure operator convenience, an intuitive interface was created based on the Magelis HMISTU855 touch panel, which displayed system operating parameters, alarm signals and control modes.

Keywords: drying unit, intelligent control system, automation, cement mixtures, drying process, adaptive control, multiphysics modeling, energy efficiency, gas burner, electric drive.

LIST OF PUBLICATIONS

Scientific works that reflect the main scientific results of the dissertation:

1. Pliuhin, V., Zablodskiy, M., Tsegelnyk, Y., & Slovikovskyi, O. (2022). Development of Imitation Model of an Electromechanical Energy Converter with a Solid Rotor in ANSYS RMxprt, Maxwell and Twin Builder. *Lighting Engineering & Power Engineering*, 61(1), 21–29. <https://doi.org/10.33042/2079-424X.2022.61.1.03>

2. Pliuhin, V., Slovikovskyi, O., & Synelnykov, O. (2024). Formation the Robotic Mechanism Digital Twin Structure. *Lighting Engineering & Power Engineering*, 63(1), 27–34. <https://doi.org/10.33042/2079-424X.2024.63.1.04>
3. Pliuhin, V., Tsegelnyk, Y., & Slovikovskyi, O. (2024). Digital Twins of Different Types Electrical Machines. *Lighting Engineering & Power Engineering*, 63(2), 35–45. <https://doi.org/10.33042/2079-424X.2024.63.2.01>
4. Sukhonos, M., Pliuhin, V., Tsegelnyk, Y., Slovikovskyi, O., & Varvianska, V. (2022). Development of Electric Drive Control System in SoMachine (Schneider Electric). *Lighting Engineering & Power Engineering*, 61(3), 93–106. <https://doi.org/10.33042/2079-424X.2022.61.3.03>
5. Aksonov, O., Pliuhin, V., Tsegelnyk, Y., Slovikovskyi, O., Duniev, O., & Yehorov, A. (2022). Electric Drive SCADA Development with Vijeo Designer (Schneider Electric). *Lighting Engineering & Power Engineering*, 61(3), 107–121. <https://doi.org/10.33042/2079-424X.2022.61.3.04>
6. Bolbot, I., Slovikovskyi, O. (2025). Intelligent Optimization Of Gas Burner Operating Modes For Cement Drying Units. (2025). *Lighting Engineering & Power Engineering*, 64(1), 9-15. <https://doi.org/10.33042/2079-424X.2025.64.1.02>
7. Bolbot, I., Slovikovskyi, O. (2025). Multi-Physics Modeling and Adaptive Control of Gas Burner Systems for Enhanced Energy Efficiency and Emission Reduction in Cement Drying Processes. (2025). *Lighting Engineering & Power Engineering*, 64(2), 51-56. <https://doi.org/10.33042/2079-424X.2025.64.2.01>
8. Bolbot, I., & Slovikovskyi, O. (2025). Mathematical modelling of the gas burner air intake damper drive. *Machinery & Energetics*, 16(3), 48-57. <https://doi.org/10.31548/machinery/3.2025.48>
9. Болбот І.М., Словіковський О.М., Заблодський М.М. Комп'ютерна програма «Оптимізація режиму роботи газового пальника «GAS BURNER OPT». Патент на твір №140037, 13.10.2025, бюл. № 95 від 28.11.2025. <https://iprop-ua.com/cr/dk1mqss6/>
10. Болбот І.М., Словіковський О.М., Заблодський М.М. Комп'ютерна програма «Комп'ютерна програма «Моделювання шибери повітрязбірника

«FLAP DC»». Патент на твір №140038, 13.10.2025, бюл. № 95 від 28.11.2025.
<https://iprop-ua.com/cr/7s59sq0b/>

Scientific works that certify the approval of the dissertation materials:

11. О.М. Словіковський, Б.С. Левандовський, В.Є. Плюгін. Сучасні підходи для створення інтегрованих енергетичних систем із розподіленою генерацією. Матеріали IV Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених «Проблеми сучасної електроенергетики, електротехніки та електромеханіки у післявоєнному періоді», 24 листопада 2023 р С. 61-64.

<https://ojs.kname.edu.ua/index.php/area/article/view/3266>

12. О.М. Словіковський, Д.С. Харшев, В.Є. Плюгін. Аналіз технічних та економічних параметрів компонентів сонячної енергетичної системи. Матеріали IV Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених «Проблеми сучасної електроенергетики, електротехніки та електромеханіки у післявоєнному періоді», 24 листопада 2023 р С. 69-72.

<https://ojs.kname.edu.ua/index.php/area/article/view/3268>

13. О.М. Словіковський, Жилін А.В., Плюгін В.Є. Розробка системи стабілізації швидкості генератора електростанції при коливанні навантаження / А.В. Жилін, В.Є. Плюгін // Тези доповідей III Всеукраїнської наук.-практ. конф. «Проблеми сучасної електроенергетики, електротехніки та електромеханіки у післявоєнному періоді», 19-21 жовтня 2022 р. – Харків: ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2022, С. 16-17.

<https://ojs.kname.edu.ua/index.php/area/article/view/2988>

14. Pliuhin, V., Sukhonos, M., Slovikovskyi, O., Dolzhenko, I. (2026). AI-Powered Robotic Mechanisms for Handling Radioactive Materials. In: Arsenyeva, O., Romanova, T., Sukhonos, M., Biletskyi, I., Tsegelnyk, Y. (eds) Smart Technologies in Urban Engineering. STUE 2024. Lecture Notes in Networks and

Systems, vol 1659. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-032-06832-3_21
[Scopus]

15. Словіковський О.М., Болбот І.М. Сучасні підходи до автоматизації процесу горіння в газових пальниках промислових сушарок. Харків, тези XXXIII Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» MicroCAD-2025, м. Харків, 14-17 травня 2025 р., с. 113.
<https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/91247>

ЗМІСТ

ВСТУП	27
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ УПРАВЛІННЯ РОБОТОЮ ГАЗОВОГО ПАЛЬНИКА.....	32
1.1 Сушильний агрегат: конструкція, режими роботи та процеси сушіння.....	32
1.1.1 Вступ.	32
1.1.2 Конструкція сушильного агрегату.	33
1.1.3 Режими роботи сушильного агрегату.	37
1.1.4 Процес сушіння.	37
1.2 Огляд та застосування газових пальників	38
1.3 Засоби керування режимами роботи газового пальника	44
1.4 Огляд систем керування роботою газового пальника.....	47
1.5 Прототип виробничої установки з газовим пальником	55
1.6 Постановка задач дослідження.....	60
1.7 Висновки до розділу 1	63
РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ РЕЖИМІВ ГАЗОВОГО ПАЛЬНИКА	65
2.1 Особливості і вимоги до показників технологічного процесу.....	65
2.2 Математична модель процесів газодинаміки у пальнику.....	71
2.2.1 Основні рівняння газодинаміки.....	71
2.2.2 Турбулентність і змішування газів.....	73
2.2.3 Хімічні реакції та горіння.	74
2.2.4 Теплообмін у зоні горіння.....	75

2.3 Математична модель системи електричного приводу газового пальника	77
2.3.1 Огляд електричних приводів газового пальника.....	77
2.3.2 Електричний привод вентиляторів	80
2.3.3 Електричний привод шибера повітрязабірника та подачі палива	89
2.3.4 Привід шибера повітрязабірника.	92
2.4 Оптимізація режимів роботи газового пальника	95
2.5 Висновки до розділу 2	101
РОЗДІЛ 3 ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ГАЗОВОГО ПАЛЬНИКА.....	103
3.1 Складові імітаційної моделі в Ansys.....	103
3.1.1 Загальний підхід до моделювання.	103
3.1.2 Процеси газодинаміки в Ansys Fluent.....	103
3.1.3 Моделювання електродвигунів у Ansys Maxwell.	104
3.1.4 Системи частотного керування в Ansys Twin Builder.....	105
3.1.5 Інтеграція розрахункових модулів.	105
3.2 Модель процесів газодинаміки в Ansys Fluent	106
3.3 Моделювання теплообміну та вологості у процесі сушіння	115
3.4 Модель системи електричного приводу в Ansys Twin Builder ..	118
3.4.1 Асинхронний двигун із короткозамкненим ротором.....	118
3.4.2 Двигун постійного струму.	126
3.4.3 Скалярне керування асинхронним двигуном.....	131
3.4.4 Векторне керування асинхронним двигуном.....	138
3.4.5 Керування двигуном постійного струму.	146

3.5 Інтелектуальна система керування режимами сушильного агрегату на основі генетичного алгоритму	149
3.5.1 Формалізація задачі генетичної оптимізації технологічних параметрів	149
3.5.2 Модель хромосоми та еволюційні оператори.....	160
3.5.3 Імітаційне дослідження роботи генетичного алгоритму	166
3.6 Перевірка адекватності розроблених моделей.....	173
3.7 Висновки до розділу 3	176
РОЗДІЛ 4 РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ГАЗОВИМ ПАЛЬНИКОМ	180
4.1 Конструкція та експлуатація газового пальника	180
4.2 Апаратна реалізація системи керування.....	184
4.3 Реалізація системи керування в SoMachine Logic Builder	192
4.4 Система диспетчерського керування в Vijeo Designer.....	206
4.5 Інтелектуальна система керування роботою сушильного агрегату	212
4.5.1 Структура інтелектуальної системи.....	212
4.5.2 Алгоритм системи керування	218
4.5.3 Експлуатаційні характеристики системи керування.....	223
4.5.4 Тестування системи інтелектуального керування.....	228
4.6 Висновки до розділу 4	233
ВИСНОВКИ.....	235
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	237
ДОДАТКИ.....	257
ДОДАТОК А КОНСТРУКЦІЯ ПАЛЬНИКА	258

ДОДАТОК Б СХЕМИ ЕЛЕКТРИЧНІ ПРИНЦИПОВІ	259
ДОДАТОК В ДІАГРАМА СИГНАЛІВ БЛОКУ КЕРУВАННЯ.....	262
ДОДАТОК Г ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ РОЗРАХУНКІВ	263
ДОДАТОК Д СХЕМИ ЕЛЕКТРИЧНІ ПРИНЦИПОВІ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ.....	278
ДОДАТОК Ж АКТ ПРО ОТРИМАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ.....	281

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. Вибір теми дослідження обумовлений необхідністю вирішення актуальних задач, пов'язаних із забезпеченням енергоефективності, стабільності та екологічної безпеки роботи газових пальників, які є важливими елементами промислових і теплотехнічних систем. Сучасні вимоги до зменшення витрат палива, зниження викидів шкідливих речовин і підвищення надійності теплотехнічного обладнання вимагають розробки інтегрованих систем автоматизації, які поєднують точне керування приводами, адаптивне регулювання робочих параметрів та ефективну обробку даних.

Газові пальники відіграють ключову роль у таких галузях, як енергетика, металургія, хімічна промисловість та будівельна індустрія, і їхня робота значною мірою визначає продуктивність технологічних процесів. Водночас традиційні підходи до регулювання роботи пальників мають значні обмеження, зокрема у забезпеченні динамічної адаптації до змін технологічних умов. Недостатня ефективність керування може призводити до перевитрати енергоресурсів, нестабільності горіння та підвищення рівня шкідливих викидів.

Сьогоднішній розвиток обчислювальних технологій і програмного забезпечення, такого як Ansys Fluent, Ansys Maxwell і Ansys Twin Builder, відкриває нові можливості для комплексного моделювання та оптимізації процесів роботи газових пальників. Вибір теми дослідження зумовлений перспективністю використання цих інструментів для створення багатофізичних моделей, які враховують взаємодію газодинамічних, теплових та електромеханічних процесів.

Крім того, сучасні рішення в галузі автоматизації, такі як контролери Schneider Electric, частотні перетворювачі та сенсорні панелі, дозволяють створювати гнучкі та високоефективні системи керування, які відповідають вимогам промислових стандартів. Інтеграція цих технологій у дослідження

дозволяє забезпечити високу точність регулювання режимів роботи, зменшення енергоспоживання та підвищення надійності обладнання.

З огляду на зазначене, дослідження автоматизації режимів роботи газового пальника є *актуальним науково-прикладним завданням* із точки зору наукової новизни, практичної значущості та актуальності поставлених задач для промисловості, а також відповідає сучасним тенденціям у сфері автоматизації та енергоефективності.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота виконана в рамках науково-дослідної роботи №0123U100671 «Розвиток теорії та моделювання нестационарних електрофізичних процесів в електропровідних і діелектричних середовищах імпульсних електромагнітних систем» (<https://nrat.ukrintei.ua/searchdoc/0123U100671/>) та науково-дослідної роботи №0226U002768 «Розробка електротехнології підготовки та спалювання паливних сумішей з утилізованою водою та рідинними відходами різного походження» (договір № 110/1- пр -2023 від «21 » березня 2023 р., <https://nrat.ukrintei.ua/searchdoc/0226U002768/>), в яких автор був виконавцем НДР.

Мета дисертаційної роботи полягає в розробці інтелектуальної системи керування сушильним агрегатом, що забезпечує адаптивне регулювання процесу сушіння для підвищення енергоефективності та стабільності технологічного процесу.

Об'єкт дослідження – процес керування сушінням сировини у сушильному агрегаті при виробництві цементних сумішей, зокрема режимами теплообміну, масообміну, регулювання швидкості обертання барабана, температури та вологості матеріалу.

Предмет дослідження – методи, моделі та алгоритми інтелектуального керування технологічними параметрами сушильного агрегату, що забезпечують підвищення енергоефективності та стабільності процесу сушіння.

Наукова новизна отриманих результатів.

Уперше розроблено комплексний підхід до багатофізичного моделювання та оптимізації сушильного агрегату, який дозволяє враховувати взаємозв'язок газодинамічних, теплових та електромеханічних процесів при експлуатації в режимі реального часу.

Уперше розроблено математичну модель системи керування газовим пальником сушильного агрегату з урахуванням динаміки приводів вентиляторів і шибера повітрязбірника, що забезпечує адаптивне регулювання параметрів горіння та процесу сушіння.

Дістало подальшого розвитку використання підходу до моделювання та оптимізації режимів роботи сушильних агрегатів на основі інтеграції математичних моделей, систем автоматизації та засобів імітаційного моделювання для аналізу роботи технологічного обладнання в умовах змінного навантаження та нестационарних режимів роботи.

Дістало подальшого розвитку використання симуляційного моделювання для аналізу роботи приводів і систем керування в умовах змінного навантаження та аварійних ситуацій шляхом створення інтегрованої моделі газового пальника, у якій дані Ansys Fluent про температуру та тиск передаються в Ansys Twin Builder для моделювання реакції системи керування, що дозволяє досліджувати динамічну поведінку системи в реальних умовах експлуатації.

Удосконалено методи автоматичного керування режимами роботи сушильного агрегату шляхом застосування векторного та скалярного керування електроприводами, а також PID-регулювання виконавчих

механізмів, що дозволило підвищити точність стабілізації технологічних параметрів та знизити енергоспоживання системи.

Практичне значення одержаних результатів.

Розроблені моделі та алгоритми можуть бути використані для проєктування нових систем газових пальників, модернізації існуючих, а також інтеграції в автоматизовані системи керування. MATLAB-реалізації дозволяють проводити валідацію результатів та оцінювати вплив різних параметрів на роботу пальника.

Розроблено комплексну інтегровану систему керування газовим пальником, яка поєднує математичні моделі газодинамічних процесів, моделі електромеханічних приводів та адаптивні алгоритми керування із використанням багатофізичного моделювання в середовищах Ansys Fluent, Ansys Maxwell та Ansys Twin Builder. Особливістю є створення моделей двигунів у вигляді ROM-об'єктів, що базуються на результатах електромагнітного аналізу, та їх інтеграція в систему керування для забезпечення точного регулювання режимів роботи.

Використання результатів роботи полягає у можливості застосування створених моделей для проєктування та оптимізації систем автоматизації газових пальників. Зокрема, запропонований підхід дозволяє зменшити енергоспоживання вентиляторів на 10-15% за рахунок адаптивного регулювання швидкості, а також забезпечити стабільну роботушибера з мінімальною похибкою позиціонування, що сприяє покращенню горіння та зменшенню викидів шкідливих речовин.

Особистий внесок здобувача. Результати за темою дисертації відображено у 15 наукових працях. Зокрема, 8 із них – це статті у фахових виданнях категорії Б, які входять до переліку, затвердженого Департаментом атестації кадрів МОН України, 1 стаття у виданні, що входить до міжнародної наукометричної бази Scopus, 4 тези доповідей на конференціях, 2 авторських свідоцтва на твір.

Усі наукові твердження, висновки та рекомендації в даній роботі сформульовані автором особисто.

Апробація результатів дисертації. Основні результати роботи доповідалися й обговорювалися на таких науково-технічних конференціях: I Міжнародна науково-практична конференція «Цифрові технології в енергетиці і автоматичі» присвячена 125-річчю НУБіП України та 90-річчю ННІ енергетики, автоматики і енергозбереження. 2023 р.; II Міжнародна науково-практична конференція «Цифрові технології в енергетиці і автоматичі». 2024 р.; Міжнародна Scopus конференція «Smart Technologies in Urban Engineering». (м. Харків, 9-11 червня 2024 р.); XXXIII Міжнародна науково-практична конференція «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (MicroCAD–2025) (м. Харків, 15-17 травня 2025 р.), дистанційно.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ УПРАВЛІННЯ РОБОТОЮ ГАЗОВОГО ПАЛЬНИКА

1.1 Сушильний агрегат: конструкція, режими роботи та процеси сушіння

1.1.1 Вступ. Сушильні агрегати є ключовими елементами у виробництві цементних сумішей, оскільки вони забезпечують видалення надлишкової вологи з вихідних матеріалів, що безпосередньо впливає на якість кінцевого продукту. Вологість сировини визначає її подальшу поведінку в технологічному процесі, зокрема під час змішування з іншими компонентами та випалу. Неконтрольоване утримання вологи може призвести до зниження міцності цементних виробів, нерівномірного зчеплення частинок та додаткових енергетичних витрат на подальше висушування. Таким чином, правильний вибір сушильного агрегату та його оптимальне функціонування є критично важливими для стабільності процесу виробництва цементних сумішей.

Традиційні системи керування сушильними агрегатами ґрунтувалися на застосуванні класичних регуляторів пропорційно-інтегрально-диференційного (ПІД) типу із заздалегідь визначеними коефіцієнтами. Їхня робота забезпечувала лише підтримання основних параметрів у заданих діапазонах. Однак у практиці виробництва цементних сумішей часто мають місце ситуації, коли вхідні умови процесу змінюються раптово: вологість сировини може коливатися в межах від 8 % до 22 %, температура гарячого повітря – від 180 до 450 °С, а швидкість обертання барабана повинна змінюватися від 1,5 до 4,2 об/хв залежно від завантаження.

У таких умовах статичні налаштування втрачають ефективність, що призводить до перевитрат енергії, нерівномірності сушіння та зниження продуктивності. Саме тому виникає необхідність у створенні інтелектуальної системи, яка здатна самонавчатися, прогнозувати зміни та адаптувати режими роботи в реальному часі.

1.1.2 Конструкція сушильного агрегату. Сучасні сушильні агрегати (рис. 1.1) складаються з кількох основних компонентів: сушильного барабана (рис. 1.2), газового пальника та вентиляторів (рис. 1.3), системи подачі та транспортування матеріалу (рис. 1.4), а також системи керування та контролю температури і вологості.

Сушильний барабан є головним елементом агрегату, що представляє собою обертовий циліндр із металу, встановлений на опорних роликах. Його конструкція передбачає наявність внутрішніх лопатей та перегородок, які сприяють рівномірному розподілу матеріалу та покращують ефективність процесу випаровування води. Високоякісні матеріали, з яких виготовлений барабан, забезпечують довговічність агрегату та його стійкість до високих температур і агресивних середовищ.

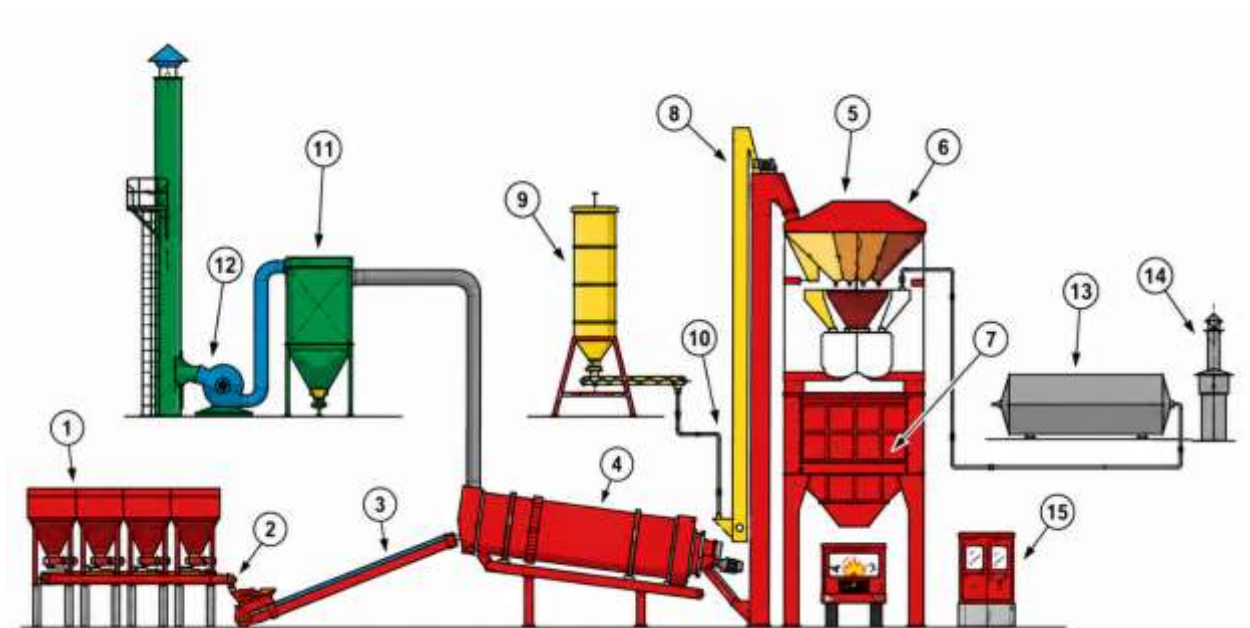


Рисунок 1.1 – Загальна схема сушильного агрегату:

1 – агрегат живлення; 2 – вібро-лоток; 3 – конвеєр; 4 – сушильний барабан; 5, 8 – труби розподільчі; 6 – гарячий бункер; 7 – грохот; 9 – агрегат мінерального порошку; 11, 12 – агрегат знепилення; 13 – витратна ємність бункера; 14 – дозатор; 15 – контрольна камера

Газовий пальник є основним джерелом теплової енергії, необхідної для процесу сушіння (рис. 1.3). Його робота базується на спалюванні природного газу або інших видів палива, що дозволяє створити стабільний температурний режим усередині сушильного барабана. Регулювання потужності пальника та контроль температури забезпечують оптимальні умови для сушіння сировини та запобігають перегріванню або нерівномірному висиханню матеріалу.

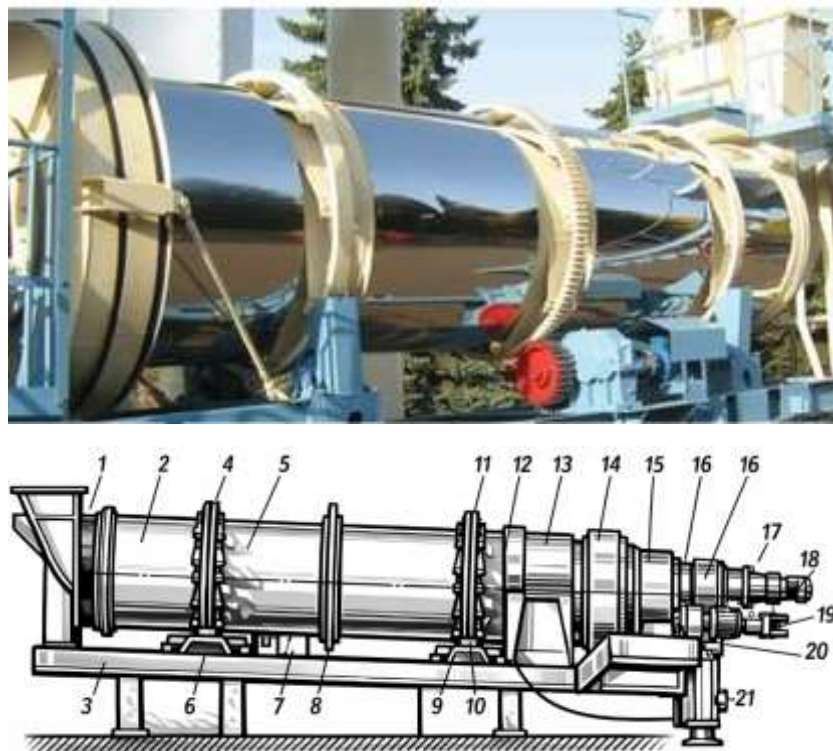


Рисунок 1.2 – Схема сушильного барабану

1 – завантажувальна та димова коробки; 2 – сушильний барабан; 3 – рама; 4, 11 – бандажі сушильного барабана; 5 – компенсатор; 6, 10 – опорний ролик; 7 – привод; 8 – зубчастий венець; 9 – захисний кожух; 12 – кожух охолодження барабана; 13 – розвантажувальна коробка; 14 – топка; 15 – запальна форсунка; 16 – датчик горіння палива; 17 – форсунка; 18 – регулювання подачі палива; 19 – паливопровід; 20 – розвантажувальний лоток; 21 – вентилятор охолодження барабану.

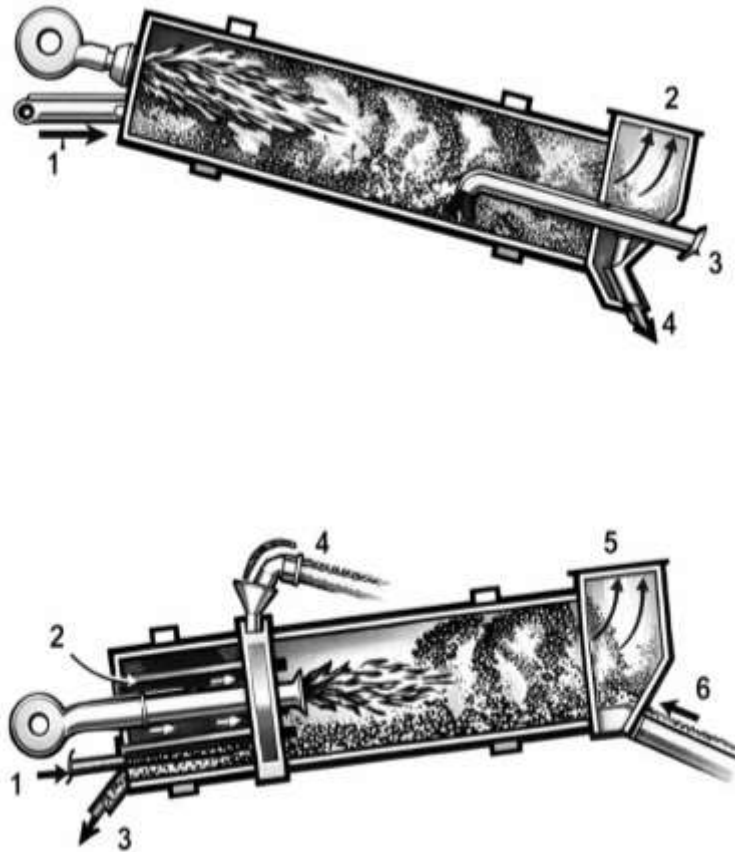


Рисунок 1.3 – Газовий пальник у сушильному барабані з вентиляторами циркуляції повітря

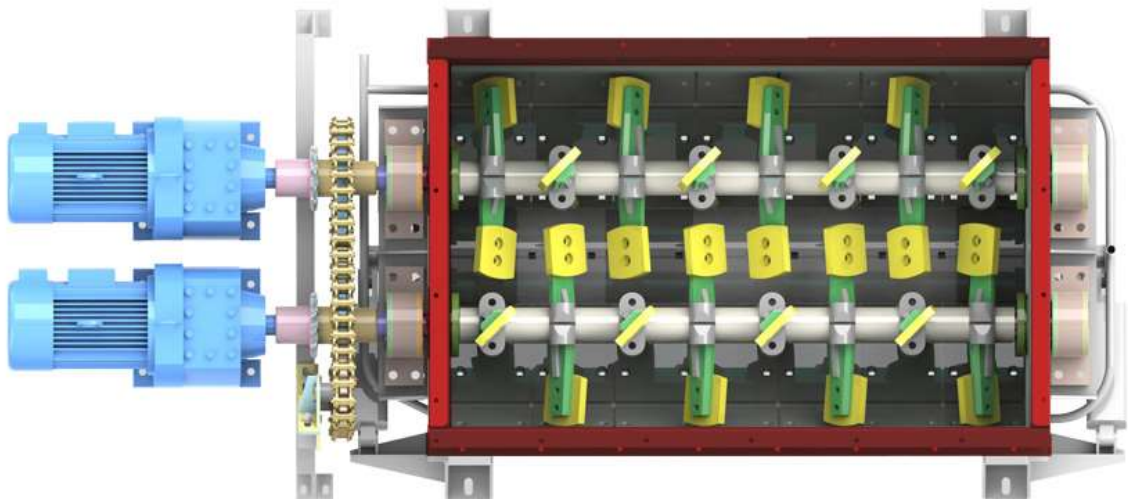


Рисунок 1.4 – Змішувач мінерального порошку

Вентилятори виконують важливу функцію подачі гарячого повітря та відведення продуктів згоряння і випаровування вологи. Вони забезпечують ефективну циркуляцію повітря у всьому об'ємі барабана, що сприяє рівномірному розподілу тепла і запобігає утворенню локальних зон перегріву.

Система подачі та транспортування матеріалу (рис. 1.5) відіграє важливу роль у забезпеченні безперервності процесу сушіння. Вона включає механізми завантаження вихідної сировини та вивантаження висушеного матеріалу, які працюють у синхронізації з іншими компонентами агрегату. Швидкість подачі матеріалу коригується автоматично залежно від рівня вологості, що дозволяє зменшити енергетичні витрати та покращити якість сушіння.



Рисунок 1.5 – Система подачі, знепилення та транспортування матеріалу

Система керування та контролю забезпечує автоматизоване регулювання всіх параметрів роботи сушильного агрегату. Вона включає датчики температури, вологості та газоаналізатори, які відстежують склад продуктів згоряння. Завдяки використанню сучасних алгоритмів керування, система може оперативно реагувати на зміну вхідних параметрів і підтримувати оптимальні умови для сушіння матеріалу.

1.1.3 Режими роботи сушильного агрегату. Функціонування сушильного агрегату залежить від технологічних вимог та характеристик оброблюваної сировини. Режими роботи агрегату визначаються типом сушіння та рівнем температурного впливу. Загалом, розрізняють три основні режими: конвективне, контактне та комбіноване сушіння.

Конвективний режим є найпоширенішим способом сушіння, що базується на нагріванні матеріалу гарячими газами. Цей метод забезпечує рівномірне випаровування вологи та високу продуктивність процесу.

Контактний режим включає передачу тепла через безпосередній контакт матеріалу з нагрітими поверхнями барабана. Цей метод використовується у випадках, коли необхідно уникнути перегріву матеріалу або досягти специфічних фізичних характеристик висушеної сировини.

Комбінований режим поєднує переваги конвективного та контактного сушіння, що дозволяє гнучко налаштовувати параметри процесу залежно від конкретних вимог виробництва.

1.1.4 Процес сушіння. Процес сушіння у барабанному агрегаті складається з кількох етапів. Спочатку матеріал завантажується у барабан, де піддається попередньому підігріву за допомогою гарячих газів. Це сприяє зниженню внутрішньої вологи та підготовці матеріалу до подальшої обробки. Далі інтенсивне випаровування вологи забезпечується теплообміном між гарячим повітрям та матеріалом, що супроводжується відведенням парів вологи за допомогою вентиляторів.

На заключному етапі сушіння матеріал піддається остаточному видаленню залишкової вологи до заданого рівня. Ефективність цього етапу залежить від температури в барабані, швидкості руху матеріалу та часу його перебування у сушильній зоні. Завершальний контроль вологості дозволяє отримати матеріал із потрібними параметрами, що забезпечує його подальше використання у виробництві цементних сумішей.

Оптимізація конструкції, вибір режимів роботи та контроль процесу сушіння є важливими факторами, що визначають якість кінцевого продукту.

Інтелектуальні системи керування дозволяють підвищити ефективність сушильного агрегату, знизити витрати енергії та покращити стабільність виробничого процесу.

1.2 Огляд та застосування газових пальників

Газові пальники є важливими елементами сучасних теплотехнічних систем, що широко застосовуються у різних галузях промисловості, зокрема у виробництві цементних сумішей. Їх основною функцією є генерація теплової енергії шляхом спалювання природного або іншого виду газу з подальшою передачею тепла до робочого середовища. Завдяки високій енергоефективності, можливості точної автоматизації та екологічним перевагам газові пальники є незамінним обладнанням у технологічних процесах, які вимагають точного контролю температурного режиму [1-3].

В технологічному процесі виготовлення сухих будівельних сумішей пальник використовується як нагрівальний елемент в сушильному барабані, який є основною складовою електроустановки виробництва [4-5]. Пальник – це теплогенеруючий пристрій, в якому відбувається процес змішування повітря та газоподібного палива з подальшою подачею до вихідного отвору, де здійснюється спалювання суміші з утворенням стійкого фронту горіння, що має назву факел [6].

Існує широкий спектр конструкцій газових пальників, які класифікуються за кількома критеріями. Залежно від принципу змішування палива з повітрям, пальники поділяються на інжекційні, дифузійні та попередньо змішувальні [7-10]. Класифікація газових пальників зображена на рис. 1.6.

Інжекційні факельні пальники здійснюють змішування газу з повітрям у процесі подачі, завдяки чому забезпечується висока швидкість реакції горіння [12-14]. Конструкція пальника (рис. 1.7) складається з регулятора подачі первинного повітря, насадки, сопла і змішувача-інжектора. Газ подається в сопло.

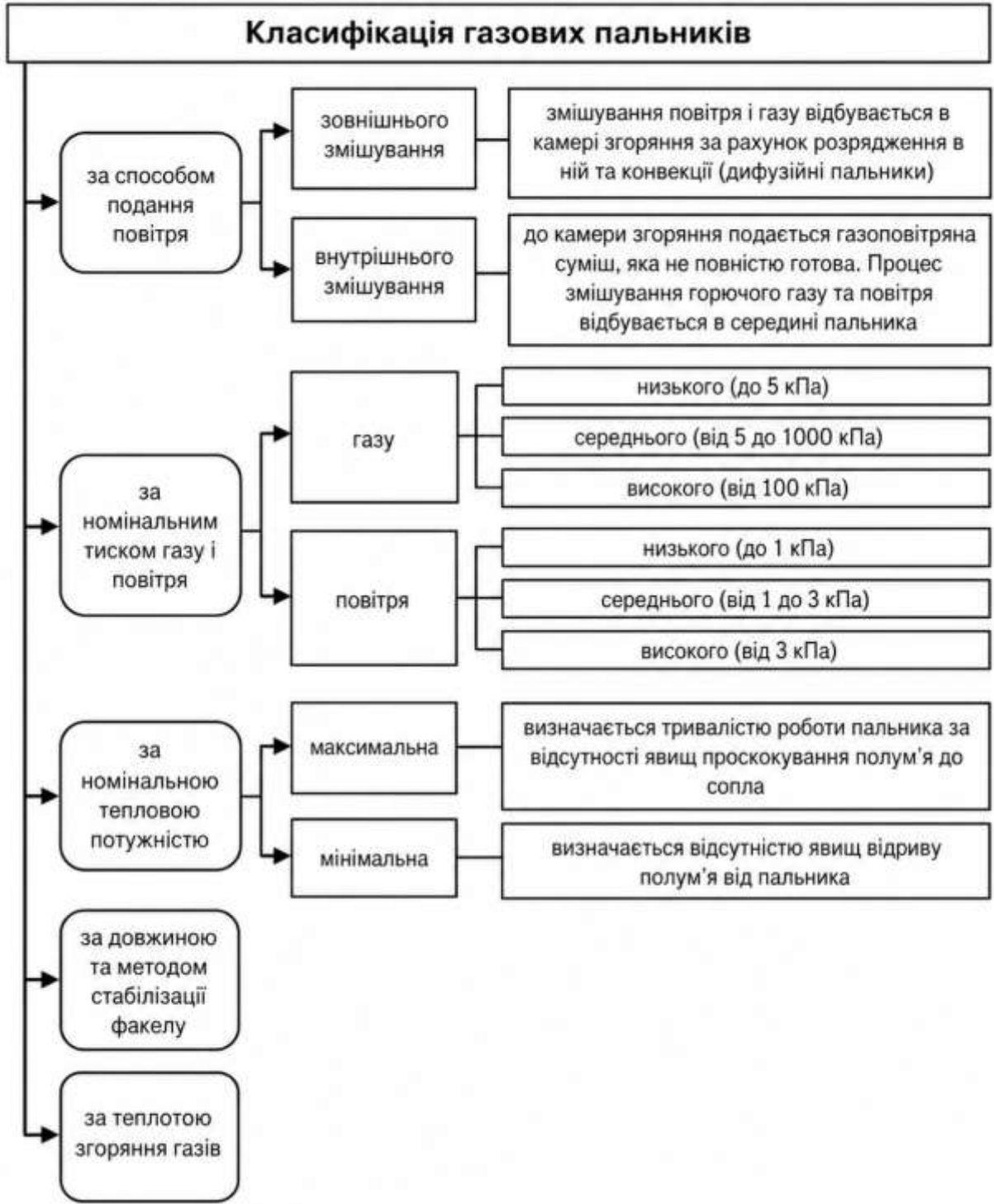


Рисунок 1.6 – Класифікація газових пальників



Рисунок 1.7 – Принципова схема інжекційного газового пальника: 1 – сопло; 2 – регулятор первинного повітря; 3 – конфузур; 4 – горловина; 5 – дифузур; 6 – насадка змішувача-інжектора

Оскільки діаметр газопровідної трубки значно більше розміру сопла, газ виходить з останнього з великою швидкістю, таким чином, створюючи в змішувачі-інжекторі розрідження. За рахунок цього в змішувач з навколишнього середовища надходить "первинне" повітря (від 30 до 70 відсотків об'єму, необхідного для повного згорання газу). Недостатня кількість повітря ("вторинне" повітря) поступає в камеру згорання з атмосфери за рахунок інжекційної дії газоповітряних струменів. Такі пальники характеризуються простотою конструкції та є зручними для застосування в системах із високими вимогами до регулювання факела.

Дифузійні пальники (рис. 1.8) забезпечують змішування газу і повітря безпосередньо в зоні горіння [14–17]. Вони відрізняються стабільністю роботи навіть при змінних параметрах паливного газу, що робить їх ефективними для процесів із підвищеними вимогами до безперервної роботи.

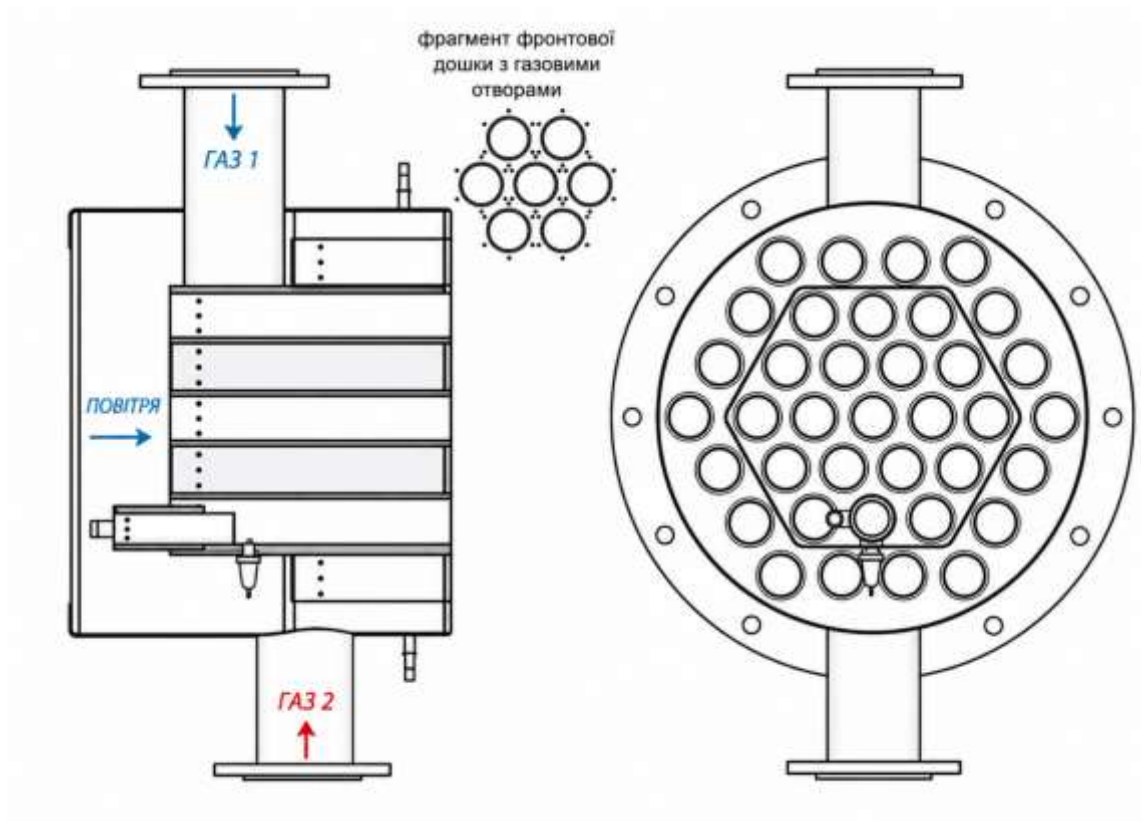


Рисунок 1.8 – Принципова схема дифузійного пальника ДСГМ-750ІІ [14]

Пальники попереднього змішування (рис. 1.9) формують газо-повітряну суміш перед її подачею в зону горіння [18, 19]. Такі конструкції забезпечують високий рівень тепловіддачі, але вимагають більшого рівня автоматизації для контролю процесу горіння.

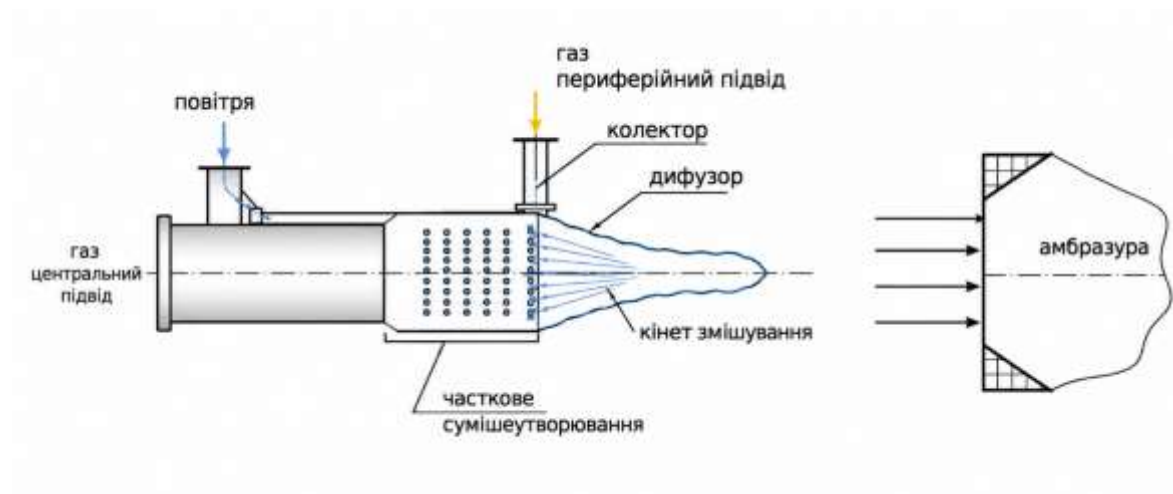


Рисунок 1.9 – Газовий пальник попереднього змішування

За конструктивними особливостями виділяють атмосферні пальники, які використовують природну тягу для подачі повітря [9, 10], та вентиляторні пальники [20], що забезпечують примусову подачу повітря за допомогою компресорів чи вентиляторів. Вентиляторні пальники є більш гнучкими у налаштуванні та забезпечують вищу стабільність горіння (рис. 1.10).



Рисунок 1.10 – Зовнішній вигляд газового пальника вентиляторного типу

Залежно від сфери застосування розрізняють пальники низької, середньої та високої потужності [21, 22]. Пальники низької потужності зазвичай використовуються у побутових системах опалення, тоді як середньо- та високопотужні пальники застосовуються у промислових процесах, таких як виробництво цементу, випалення кераміки, плавка металів та енергетичні установки.

Газові пальники знаходять широке застосування в різних галузях промисловості завдяки високій енергоефективності, надійності та можливості точного регулювання теплової потужності. У виробництві цементних сумішей газові пальники є основним джерелом теплової енергії сушильних агрегатів, забезпечуючи необхідний температурний режим для видалення вологи із сировинних компонентів [23, 24]. Стабільність процесу сушіння безпосередньо впливає на якість підготовки матеріалу до подальших

технологічних операцій, продуктивність обладнання та питомі витрати енергії. Використання сучасних газових пальників дозволяє підтримувати задані параметри горіння та оперативно адаптувати тепловий режим до змін характеристик сировини і виробничого навантаження.

Крім цементної промисловості, газові пальники широко використовуються у металургії для нагрівання металевих заготовок перед куванням чи прокаткою, а також у ливарних процесах. У керамічній промисловості пальники застосовуються для випалу виробів із глини, забезпечуючи рівномірний розподіл тепла в печах [25]. В енергетиці газові пальники є ключовим елементом котлів і турбін, де вони забезпечують ефективне спалювання палива для генерації тепла чи електроенергії.

Сучасні тенденції у розвитку газових пальників пов'язані з підвищенням їхньої енергоефективності, зменшенням шкідливих викидів та інтеграцією з інноваційними автоматизованими системами [26, 27]. На рис. 1.11 показаний сучасний газовий блоковий пальник, який містить такі комплектуючі та дозволяє реалізувати дистанційне керування:

- пристрій розпалювання;
- газовий пальник;
- запірна арматура;
- вентилятор;
- датчики тиску і датчики температури;
- регулятори витрати газу і повітря з приводом;
- системи автоматичного керування процесами;
- електронний блок керування з можливістю програмування.



Рисунок 1.11 – Блоковий газовий пальник

Розвиток датчиків і систем моніторингу сприятиме покращенню точності керування та підвищенню надійності роботи пальників у складних умовах промислового виробництва. Використання альтернативних видів палива, таких як водень чи біогаз, є перспективним напрямом, який дозволяє зробити виробництво більш екологічно безпечним [28].

Таким чином, газові пальники є важливим елементом сучасних технологічних процесів, які знаходять широке застосування в різних галузях [29]. Їх конструктивна різноманітність, універсальність і високий рівень автоматизації роблять їх незамінними для процесів, що вимагають точного контролю температури, високої енергоефективності та екологічності. Дослідження і вдосконалення газових пальників мають велике значення для підвищення продуктивності та екологічної стійкості промислового виробництва.

1.3 Засоби керування режимами роботи газового пальника

Засоби керування режимами роботи газового пальника є ключовими компонентами технологічного процесу, оскільки від точності та стабільності їх роботи залежить ефективність горіння, енергоефективність процесу та якість кінцевого продукту [30, 31]. Управління режимами роботи газового пальника полягає в регулюванні параметрів подачі палива і повітря, геометрії факела, температури в зоні горіння та складу продуктів згоряння. Для цього використовуються сучасні системи автоматизації, численні датчики та

контролери, що забезпечують оптимальні умови роботи обладнання у реальному часі [32-35].

Головними параметрами, які регулюються в процесі роботи газового пальника, є витрати газу і повітря, співвідношення паливо/повітря, температура в зоні горіння, форма і довжина факела. Співвідношення газу і повітря є ключовим фактором, який впливає на ефективність горіння. Оптимальний баланс забезпечує повне згоряння палива, мінімізує теплові втрати і запобігає утворенню шкідливих викидів, таких як оксиди азоту (NO_x) і чадний газ (CO). Недостатнє постачання повітря призводить до неповного згоряння палива, тоді як його надлишок сприяє втратам тепла.

Температура в зоні горіння є іншим важливим параметром, який впливає на стабільність технологічного процесу. Її підтримання в межах оптимальних значень досягається шляхом регулювання потужності пальника, форми факела та швидкості подачі сировини. Особливу увагу приділяють геометрії факела, оскільки його довжина та ширина визначають рівномірність розподілу тепла в зоні горіння, що є критично важливим у виробництві цементу.

Сучасне керування режимами роботи газового пальника здійснюється за допомогою автоматизованих систем, які поєднують функції моніторингу, аналізу та регулювання параметрів у реальному часі [36]. Основу таких систем складають програмовані логічні контролери (PLC), які інтегруються з численними датчиками для збору та обробки інформації.

До найбільш поширених засобів автоматизації належать датчики витрат газу та повітря, які забезпечують точний контроль подачі палива та його оптимальне змішування з повітрям. Газоаналізатори використовуються для визначення складу продуктів згоряння, зокрема вмісту CO_2 , NO_x та O_2 . Ці показники дозволяють оцінити ефективність горіння та екологічність процесу. Температурні датчики встановлюються в зоні горіння та в різних зонах обертової печі для постійного моніторингу теплового режиму.

Оперативне регулювання параметрів забезпечується модуляційними клапанами, які дозволяють змінювати витрати газу і повітря залежно від

потреб виробничого процесу. Крім того, вентилятори для подачі повітря оснащуються частотними перетворювачами, які дають змогу точно налаштовувати об'єм і швидкість подачі повітря.

Важливим елементом сучасних систем керування є програмне забезпечення, яке дозволяє операторам задавати режими роботи, аналізувати дані датчиків та вносити корективи у роботу пальника. У складніших системах використовується машинне навчання, яке дозволяє адаптувати роботу пальника до змінних умов, наприклад, зміни складу палива або навколишнього середовища [37-39].

Газові пальники працюють у кількох основних режимах, зокрема режимі низького навантаження, номінальної потужності та екологічному режимі. У режимі низького навантаження пальник працює з мінімальним рівнем витрат газу і повітря, забезпечуючи підтримання базової температури для підготовки до основного режиму або зниження продуктивності системи. У режимі номінальної потужності пальник працює на повну потужність, забезпечуючи максимальну теплову віддачу для інтенсивного технологічного процесу сушіння. Екологічний режим передбачає зниження температури горіння та оптимізацію процесу для зменшення шкідливих викидів.

Автоматизація цих режимів передбачає використання алгоритмів, які змінюють параметри роботи пальника залежно від потреб технологічного процесу [40]. Наприклад, перехід із режиму низького навантаження до номінальної потужності здійснюється автоматично за сигналами від датчиків, які контролюють температуру та стан факела. Екологічний режим активується при зниженні потреби у тепловій потужності або коли виявлено підвищений рівень шкідливих викидів.

Сучасні засоби керування газовими пальниками інтегруються в загальні системи автоматизації виробничого процесу, такі як SCADA-системи [41, 42]. Це дозволяє здійснювати централізований контроль за роботою пальника, аналізувати історичні дані про параметри горіння, а також отримувати сигнали про можливі відхилення. Інтеграція з такими системами забезпечує вищу

надійність та ефективність керування, а також дозволяє знизити витрати на технічне обслуговування завдяки прогнозуванню несправностей.

Розглянуті засоби керування режимами роботи газового пальника базуються на використанні сучасних автоматизованих систем, які поєднують високоточні датчики, програмовані контролери та програмне забезпечення для аналізу й регулювання параметрів горіння. Розвиток таких засобів сприяє підвищенню стабільності, енергоефективності та екологічної безпеки виробничих процесів.

1.4 Огляд систем керування роботою газового пальника

Сучасні газові пальники обладнані автоматизованими системами керування, які забезпечують високу точність і надійність їхньої роботи [43, 44]. Методи керування включають як ручне, так і автоматичне регулювання параметрів роботи. У ручному режимі оператор здійснює контроль за витратою палива, повітря та довжиною факела, що використовується у невеликих системах із низькими вимогами до точності.

Автоматичні системи керування базуються на використанні численних датчиків, які в реальному часі передають інформацію про основні параметри процесу, такі як температура, тиск, витрата газу та повітря, а також концентрація продуктів горіння [45, 46]. Інтегровані газоаналізатори дозволяють контролювати вміст оксидів азоту (NO_x) і вуглекислого газу (CO_2) у димових газах, що дає змогу своєчасно коригувати параметри роботи пальника для мінімізації шкідливих викидів.

Системи автоматичного керування використовують сучасні програмовані контролери (PLC) та алгоритми машинного навчання для аналізу та прогнозування змін у роботі пальника [47-49]. Такі системи забезпечують адаптивне керування, яке враховує змінні параметри процесу, наприклад, коливання тиску газу чи зміну складу сировини. Це дозволяє забезпечити стабільність роботи навіть у складних умовах виробництва.

Окремим аспектом автоматизації є можливість дистанційного моніторингу та керування через інтегровані SCADA-системи [50-53]. Це забезпечує централізований контроль усіх елементів процесу, а також дає змогу швидко реагувати на відхилення у роботі обладнання.

Системи керування газовими пальниками є основою ефективної, стабільної та екологічно безпечної роботи теплотехнічного обладнання. Вони поєднують апаратну і програмну складові, забезпечуючи контроль основних параметрів процесу горіння, таких як витрата палива, співвідношення газу і повітря, температура в зоні горіння, стабільність факела та вміст продуктів згоряння. Огляд сучасних систем керування показує, що провідні світові компанії пропонують комплексні рішення, які інтегрують функції моніторингу, регулювання і діагностики з можливістю автоматизації та дистанційного керування.

Сучасні системи керування газовими пальниками базуються на використанні програмованих логічних контролерів (PLC), цифрових датчиків та інтегрованого програмного забезпечення [54, 55]. Ці системи мають можливість адаптації до змінних умов роботи завдяки інтеграції алгоритмів машинного навчання та розширених засобів моніторингу. Використання таких систем забезпечує високу точність регулювання співвідношення газу і повітря, контроль температури і концентрації продуктів горіння в режимі реального часу.

Основними елементами систем є модулі збору даних, включаючи датчики температури, тиску, витратоміри, газоаналізатори, а також виконавчі пристрої, такі як клапани для регулювання витрат палива і повітря та вентилятори з частотними перетворювачами. Завдяки інтеграції з SCADA-системами оператори мають змогу здійснювати централізований контроль за всіма параметрами роботи пальника, отримувати оперативні повідомлення про несправності та аналізувати історичні дані для оптимізації роботи обладнання.

На ринку існує чимало рішень для автоматизації роботи газових пальників, які пропонують провідні виробники теплотехнічного обладнання.

Одним із лідерів у цій галузі є компанія Siemens, яка пропонує інноваційні системи керування газовими пальниками, такі як серія контролерів LMV [56]. Ці контролери (рис. 1.12) забезпечують точний контроль процесу горіння завдяки інтеграції датчиків температури, тиску та газоаналізаторів. Вони дозволяють автоматично регулювати витрати газу та повітря, забезпечуючи високу стабільність горіння навіть за змінних умов. Контролери LMV підтримують функцію дистанційного моніторингу та керування через протоколи зв'язку, що робить їх ідеальним вибором для промислових пальників високої потужності.



Рисунок 1.12 – Система керування пальником без підключення LMV виробництва Siemens

Ще одним важливим виробником є компанія Honeywell, яка виробляє інтелектуальні системи керування, такі як Eclipse RatioMatic [57]. Ця система (рис. 1.13) забезпечує точне регулювання співвідношення газу і повітря, автоматичний контроль температури та мінімізацію витрат палива.

Особливістю обладнання Honeywell є модульна структура, яка дозволяє легко інтегрувати систему в існуючі виробничі процеси.



Рисунок 1.13 – Система керування процесом горіння Eclipse RatioMatic

Компанія Weishaupt, відома своїми пальниками для промислового використання, пропонує системи керування серії W-FM [58]. Ці системи (рис. 1.14) оснащені вбудованими контролерами, які забезпечують високий рівень автоматизації. Завдяки використанню датчиків високої точності та сучасних алгоритмів регулювання, рішення Weishaupt дозволяють значно знизити викиди шкідливих речовин і підвищити енергоефективність роботи пальника.



Рисунок 1.14 – Менеджер горіння Weishaupt W-FM 25

Іншим відомим виробником є Riello, який спеціалізується на компактних та високоефективних системах для середніх і великих пальників [59]. Їхні модулі серії Riello RS (рис. 1.15) поєднують функції регулювання, моніторингу та автоматичного керування режимами роботи. Висока точність регулювання досягається завдяки використанню газоаналізаторів і багатофункціональних датчиків, які інтегруються у систему керування пальником.



Рисунок 1.15 – Модулі двоступеневі прогресивні серії Riello RS

Також слід відзначити компанію Maхon, яка є підрозділом Honeywell і спеціалізується на виробництві високотехнологічних пальників та систем керування для промислових печей [60]. Наприклад, система Maхon SMARTFIRE (рис. 1.16) забезпечує інтеграцію з сучасними SCADA-системами, даючи змогу віддалено керувати роботою пальника і оптимізувати режими горіння для зниження викидів та підвищення економічності процесу.



Рисунок 1.16 – Система Maxon SMARTFIRE

Сучасні системи керування активно інтегруються у загальні автоматизовані комплекси, що керують всім технологічним процесом. Наприклад, використання хмарних технологій дозволяє зберігати дані про роботу пальників, аналізувати ефективність їх використання та прогнозувати можливі несправності. Деякі системи, такі як LMV від Siemens або SMARTFIRE від Maxon, підтримують адаптивне керування, що дозволяє самостійно змінювати параметри роботи залежно від змінних умов, таких як якість палива або коливання навантаження.

Сучасні системи керування газовими пальниками є високотехнологічними рішеннями, що забезпечують точний контроль і регулювання режимів роботи. Використання інноваційного обладнання провідних виробників, таких як Siemens, Honeywell, Weishaupt та Riello, дозволяє значно підвищити енергоефективність, екологічність і надійність промислових процесів, роблячи ці системи незамінними у багатьох галузях промисловості.

Schneider Electric є одним із провідних світових виробників автоматизованих систем керування, які успішно застосовуються для керування роботою газових пальників у промислових процесах. Компанія пропонує широкий спектр рішень для теплотехнічного обладнання, які

базуються на інтелектуальних контролерах, датчиках і програмних платформах, що забезпечують високий рівень автоматизації, гнучкість налаштувань і надійність роботи.

Одним із ключових продуктів Schneider Electric у цій галузі є лінійка програмованих логічних контролерів Modicon (наприклад, Modicon M340 і Modicon M580) [61-63]. Ці контролери (рис. 1.17) забезпечують точне регулювання параметрів роботи газових пальників, включаючи витрати палива і повітря, температуру в зоні горіння, співвідношення паливо/повітря та інші важливі показники.



Рисунок 1.17 – Промисловий програмований логічний контролер Modicon M580 виробництва Schneider Electric

Завдяки своїй архітектурі Modicon легко інтегрується у складні промислові системи автоматизації, зокрема SCADA-системи. Контролери підтримують протоколи зв'язку, такі як Ethernet і Modbus, що дозволяє здійснювати дистанційний моніторинг і керування [64].

Для точного збору даних і контролю процесу компанія також пропонує широкий спектр сенсорів і вимірювальних приладів, таких як температурні датчики, витратоміри, газоаналізатори та модулі збору даних. Ці пристрої інтегруються із програмними рішеннями Schneider Electric, такими як EcoStruxure Process Expert. Ця платформа є універсальним інструментом для централізованого керування і моніторингу теплотехнічних процесів. Вона дозволяє візуалізувати дані, аналізувати історичні показники, налаштовувати режими роботи пальника та оперативно реагувати на відхилення в його роботі.

Особливої уваги заслуговують частотні перетворювачі серії Altivar, які використовуються для керування швидкістю роботи вентиляторів, що подають повітря до пальника. Це рішення забезпечує оптимальне регулювання об'єму подачі повітря, що сприяє підтриманню стабільного горіння та зниженню енерговитрат. Крім того, частотні перетворювачі мають функції енергозбереження та діагностики, які дозволяють зменшити загальні експлуатаційні витрати.

Іншим важливим продуктом Schneider Electric є платформи кібербезпеки, які інтегруються в системи автоматизації. Це особливо актуально для сучасних підприємств, оскільки віддалений доступ і дистанційне керування пальниками потребують високого рівня захисту від кібератак.

Прикладом реалізації рішень Schneider Electric може бути їх використання в цементній промисловості. Контролери Modicon та платформа EcoStruxure Process Expert забезпечують точний контроль температури в зоні спікання, мінімізуючи ризики перегріву або недогріву [65]. Частотні перетворювачі Altivar дозволяють оптимізувати роботу вентиляторів для рівномірного розподілу тепла в обертовій печі.

Завдяки модульності обладнання Schneider Electric легко адаптується до потреб конкретного виробництва, що робить його універсальним для різних галузей. Серед переваг цих рішень – висока точність регулювання, енергоефективність, можливість інтеграції з існуючими системами автоматизації та підтримка дистанційного керування.

Для досягнення цілей досліджень цієї роботи обладнання Schneider Electric використано для забезпечення комплексного підходу до керування газовими пальниками, поєднуючи сучасні технології моніторингу, регулювання і захисту. Це дозволяє підвищити стабільність технологічного процесу, зменшити енергоспоживання та забезпечити екологічну безпеку виробництва.

Подальший розвиток систем керування зосереджений на впровадженні технологій штучного інтелекту, які дозволять більш точно прогнозувати зміни у параметрах роботи пальника та автоматично коригувати налаштування для досягнення максимальної ефективності та екологічності. Крім того, дедалі більше уваги приділяється сумісності обладнання з альтернативними видами палива, такими як водень чи біогаз, що відкриває нові перспективи для зменшення вуглецевого сліду виробничих процесів.

1.5 Прототип виробничої установки з газовим пальником

В даному проекті обрано реальну установку СБ-1000 виробництва компанії «Інтербетон», технологія виготовлення продукції якої головним чином залежить від ретельної підготовки сухого, фракційного піску різної крупності [66]. Тому основною частиною процесу виробництва сухих будівельних сумішей є робота з піском [67-69].

Продуктивність установки СБ-1000 складає 45-60 м³/год. Особливості: тривалий термін служби, висока якість змішування різноструктурних матеріалів. Основні вузли установки виробництва цементних сумішей СБ-240-V:

1) Установка приемального бункера СБ-1000, яка зображена на рис. 1.18, призначена для прийому піску вологістю не більше 4%. Технічні характеристики:

- 1.1) Об'єм – 8 м³;
- 1.2) Габарити вікна прийому – 2600 × 3200 мм;
- 1.3) Висота зі сторони загрузки – 1300 мм;
- 1.4) Маса (з огороженням) – 5636 кг.

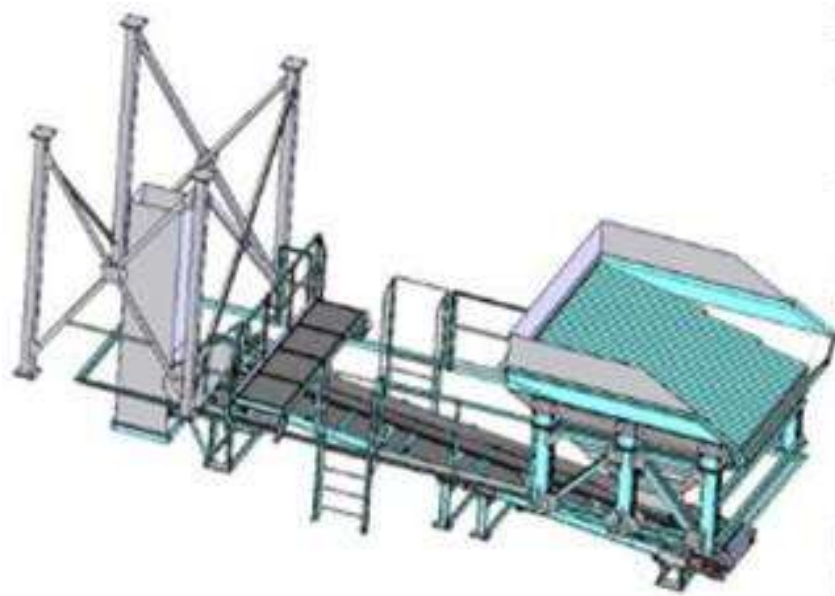


Рисунок 1.18 – Установка приемального бункера СБ-1000

2) Установка елеватора вологого піску СБ-240-V.02, яка зображена на рис. 1.19, призначена для переміщення матеріалу від стрічкового живильника на вібросито.

Технічні характеристики:

- 2.1) Продуктивність – 20 т/год;
- 2.2) Ємність ківшу – 2 л;
- 2.3) Висота – 6150 мм;
- 2.4) Швидкість руху стрічки – 1,75 м/с.
- 2.5) Тип мотор-редуктора – МТС 52AD1780/5,5кW/4р.

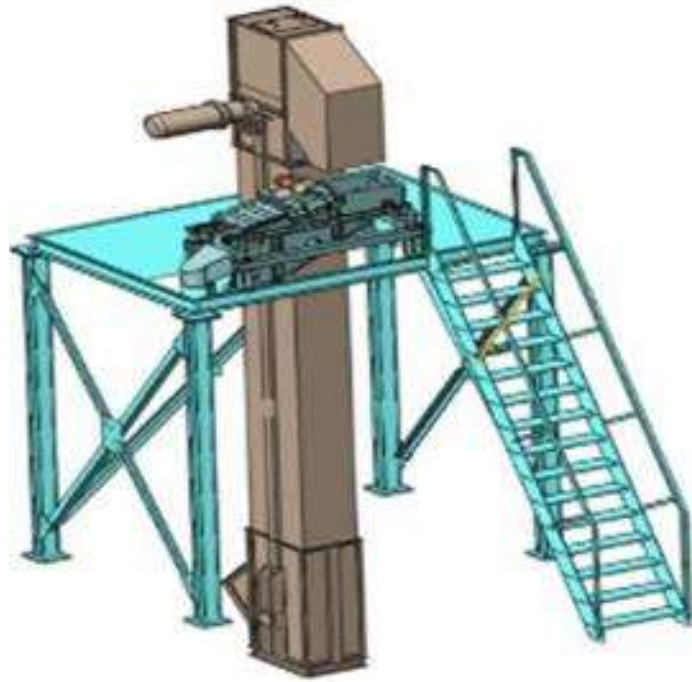


Рисунок 1.19 – Установка елеватора вологого піску

3) Резонансне вібросито СБ-145-16.20, яке зображене на рис. 1.20, призначене для просіювання вологого піску на дві фракції та видалення сміття фракцією більше 10 мм.

Технічні характеристики:

- 3.1) Продуктивність – 10 т/год;
- 3.2) Розмір осередку сита – 10 мм;
- 3.3) Потужність вібратора – 1,1 кВт;
- 3.4) Габаритні розміри– 2120 × 1560 × 975 мм;
- 3.5) Маса вузла – 3830 кг.



Рисунок 1.20 – Резонансне вібрисито

4) Установка сушильна барабанна газова СБ-240.10, яка зображена на рис. 1.21, призначена для конвективного сушіння сипучих матеріалів продуктами згоряння газу, тобто, за рахунок передачі тепла продукту за рахунок енергії нагрітого сушильного агенту, до вологості 0,2-0,4%.

Технічні характеристики:

- 4.1) Розміри від завантажувального до вихідного патрубку – 7435мм;
- 4.2) Тип електродвигуна приводу обертання барабана – 4АМ160S4У3;
- 4.3) Потужність електродвигуна – 15 кВт;
- 4.4) Частота обертання барабана – 5 об/хв;
- 4.5) Тип газового пальника – ГБГ-0,34;
- 4.6) Тип електродвигуна вентилятора газового пальника – АИР71В4;
- 4.7) Номінальна теплова потужність – 0,34 МВт;
- 4.8) Номінальний тиск газу – 1,8 кПа;
- 4.9) Витрата газу – 35 м³/год;
- 4.10) Габаритні розміри – 11000 × 2810 × 2410 мм;

4.11) Маса вузла – 8410 кг;

4.12) Продуктивність по сухому матеріалу – 7 т/год.



Рисунок 1.21 – Установка сушильна барабанна газова

Технологічний процес установки СБ-240-V, що зображена на рис. 1.22, розглядаємо включно до сушильного барабану за причиною непричетності подальшого обладнання до предмету дослідження. Межі цієї роботи обмежуються складовою сушильного барабану, а саме газовим пальником.

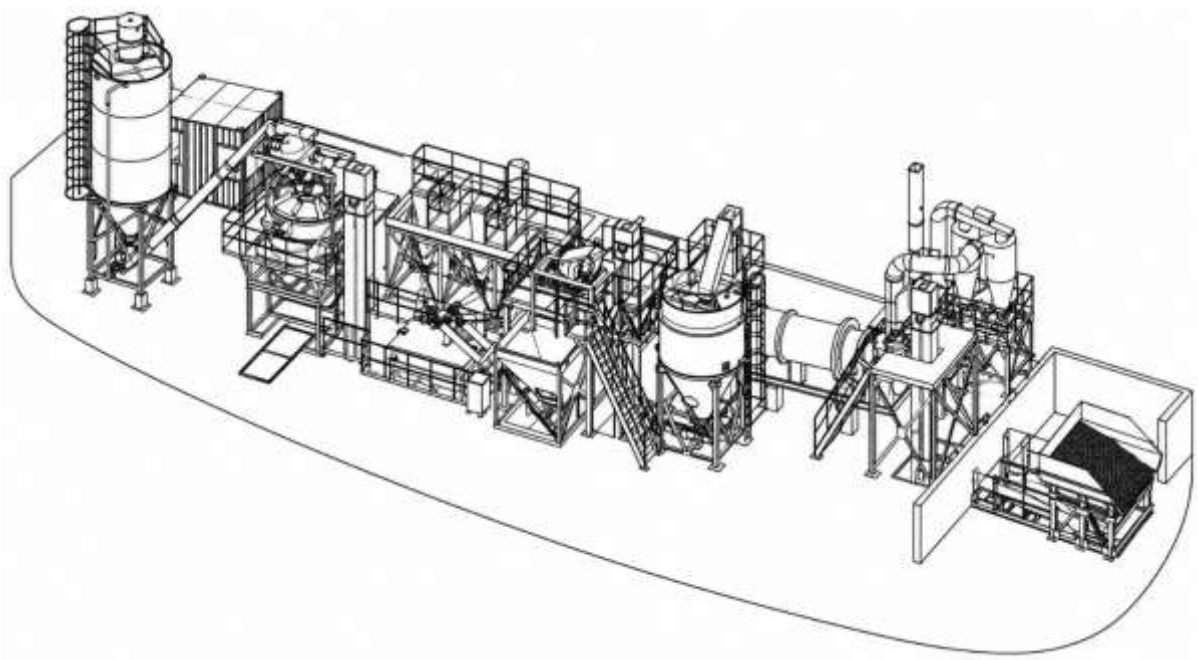


Рисунок 1.22 – Установка для виробництва сухих будівельних сумішей

Робота установки починається із завантаження сирого піску до приймального бункеру фронтальним завантажувачем. Для проходження піску на стінці бункера встановлено вібратор. Регулювання товщини шару піску на стрічці живильника здійснюється заслінкою, встановленою в нижній частині бункера.

Пісок вологістю не більше 4 % за допомогою живильника подається в елеватор, що доставляє його у вібросито для первинного очищення, протягом якого відсіюється велике сміття фракцією більше 10 мм.

Потім пісок потрапляє в сушильний барабан, в якому відбувається процес сушіння до вологості 0,2-0,4 % за принципом протитечії – назустріч матеріалу рухається потік гарячого повітря.

Сушильний барабан являє собою циліндр, що обертається, з внутрішньо розташованими лопатями та газовим пальником, що працює на природному газі та має необхідну контрольну апаратуру. На цьому розгляд технологічного процесу завершено та акцентуємо увагу на газовому пальнику сушильного барабану.

1.6 Постановка задач дослідження

В області автоматизації роботи газового пальника для виробництва цементних сумішей існує низка наукових задач, які спрямовані на вдосконалення технологічного процесу, підвищення ефективності та забезпечення екологічності. Однією з основних проблем є оптимізація температурного режиму та теплопередачі. Для цього необхідно створити точні математичні моделі, які описують динаміку нагрівання та теплопередачі в обертовій печі, враховуючи конструктивні особливості печі та пальника. Додатково важливо дослідити оптимальну конфігурацію факела для забезпечення рівномірного розподілу тепла, що дозволить уникнути локальних перегрівів або недогрівів сировини.

Інтелектуальна система керування роботою сушильного агрегату у виробництві цементних сумішей являє собою комплексне рішення, яке

об'єднує математичне моделювання, цифрові двійники, адаптивні алгоритми регулювання та засоби машинного навчання з метою досягнення високої ефективності технологічного процесу сушіння. Необхідність розробки подібної системи обумовлена не лише зростанням вимог до якості готової продукції, але й жорсткими стандартами енергоефективності та екологічної безпеки, що висуваються сучасною промисловістю.

Ще однією важливою задачею є модернізація системи керування процесом горіння. Це передбачає розробку адаптивних систем керування, які в реальному часі регулюють параметри роботи пальника, такі як подача газу, повітря та геометрія факела, залежно від змінних умов виробництва. Використання алгоритмів машинного навчання та штучного інтелекту може суттєво покращити здатність таких систем реагувати на відхилення і прогнозувати можливі несправності.

Дослідження у сфері зниження енергоспоживання також є одним із ключових напрямів. Оптимізація витрат газу та зменшення тепловтрат передбачає розробку нових економічних способів змішування газу і повітря, вдосконалення конструкції пальників і застосування матеріалів з поліпшеними теплоізоляційними властивостями.

Підвищення екологічності роботи пальника є особливо актуальною проблемою, враховуючи сучасні вимоги до зниження викидів шкідливих речовин. Наукові дослідження спрямовані на впровадження технологій низькотемпературного горіння, використання альтернативних видів палива, таких як водень або біогаз, та інтеграцію систем очищення димових газів.

Ще одним перспективним напрямом є дослідження матеріалів для виготовлення пальників, які мають витримувати екстремальні температури та агресивне середовище в зоні дії полум'я. Нові матеріали сприятимуть підвищенню довговічності обладнання та ефективності теплопередачі, а також зменшенню витрат на технічне обслуговування.

Серед інших важливих задач можна виділити створення багатофункціональних датчиків, здатних вимірювати одночасно кілька

параметрів, таких як температура, тиск, витрати газу і склад димових газів. Вдосконалення їхньої точності та стійкості до високих температур сприятиме більш ефективному моніторингу. Інтеграція цих датчиків у централізовані системи моніторингу дозволить створити комплексні автоматизовані рішення, які забезпечують повний контроль процесу і оперативне реагування на будь-які відхилення.

Науково-технічним викликом є також моделювання та симуляція роботи газового пальника. Створення високоточних симуляторів допоможе моделювати різні сценарії роботи пальника, визначати оптимальні режими роботи і мінімізувати ризики під час реального використання обладнання.

Іншим актуальним напрямом є дослідження альтернативних джерел енергії, таких як водень, біогаз або синтетичний газ. Це передбачає вивчення їхнього впливу на технологічний процес, адаптацію пальників до таких видів палива та оцінку економічної доцільності їх використання у виробництві цементу.

Також важливим завданням є створення технологій автоматичного виявлення несправностей, які здатні виявляти відхилення у роботі пальника на ранніх етапах. Використання методів комп'ютерного зору, аналізу сигналів і штучного інтелекту дозволить підвищити безпеку і надійність роботи обладнання.

Вирішення цих задач сприятиме не лише підвищенню енергоефективності та стабільності технологічного процесу, але й забезпечить зниження шкідливого впливу виробництва на довкілля. Інтеграція сучасних технологій у роботу газового пальника дозволить значно вдосконалити виробництво цементних сумішей, зробивши його більш стійким до зовнішніх викликів та конкурентоспроможним у довгостроковій перспективі.

1.7 Висновки до розділу 1

У першому розділі дисертаційної роботи проведено аналіз існуючих конструкцій газових пальників, методів керування їхніми режимами роботи та систем автоматизації, що застосовуються в сучасних теплотехнічних установках. Визначено основні області застосування газових пальників, зокрема у виробництві цементних сумішей, де вони відіграють важливу роль у процесі сушіння. Дослідження показало, що ефективність роботи пальника безпосередньо залежить від точності регулювання співвідношення газу та повітря, стабільності процесу горіння та рівномірності розподілу температури в камері згоряння.

У ході аналізу засобів керування режимами роботи газового пальника розглянуто сучасні методи регулювання подачі палива і повітря, керування температурними режимами, а також системи автоматичного контролю полум'я. Особливу увагу приділено використанню частотних перетворювачів для регулювання швидкості вентиляторів, які забезпечують адаптивне керування потоком повітря і дозволяють досягти підвищеної енергоефективності. Оцінено можливості застосування систем PID-регулювання, що дозволяють підтримувати стабільні режими горіння з мінімальними відхиленнями.

У межах огляду систем керування роботою газового пальника досліджено існуючі промислові рішення, які включають використання програмованих логічних контролерів (PLC), частотних перетворювачів, сенсорних панелей та SCADA-систем. Встановлено, що сучасні інтегровані рішення, такі як програмні комплекси Schneider Electric, дозволяють реалізувати автоматизоване керування з можливістю віддаленого моніторингу та аналізу технологічних параметрів у реальному часі.

Для забезпечення ефективності подальших досліджень було розглянуто прототип виробничої установки з газовим пальником, що враховує всі ключові аспекти його роботи, включаючи електромеханічні приводи, систему керування витратою палива і повітря, а також засоби контролю температури

та складу продуктів згоряння. Даний прототип є основою для подальшого моделювання, оптимізації та розробки алгоритмів автоматизованого керування.

У результаті виконаного аналізу обґрунтовано необхідність створення інтегрованої системи керування газовим пальником, яка базується на сучасних методах автоматизації та чисельного моделювання. Отримані результати підтвердили доцільність використання багатофізичних моделей для дослідження робочих режимів пальника, а також важливість впровадження адаптивного керування для підвищення енергоефективності та екологічної безпеки процесу горіння.

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ РЕЖИМІВ ГАЗОВОГО ПАЛЬНИКА

2.1 Особливості і вимоги до показників технологічного процесу

Використання газового пальника у виробництві цементних сумішей є ключовим елементом технологічного процесу, оскільки забезпечує необхідний рівень температури, стабільність теплопередачі та контроль за якістю кінцевого продукту [5, 6]. Особливості цього процесу пов'язані з високими вимогами до показників температурного режиму, рівномірності нагріву сировини та зменшення впливу шкідливих викидів у довкілля.

Температура в зоні дії пальника повинна бути стабільною та відповідати технологічним вимогам процесу сушіння матеріалів [18, 19]. Коливання температури можуть призводити до зниження якості сушіння, нерівномірного видалення вологи, перевитрат енергоресурсів та нестабільності роботи обладнання. Газовий пальник повинен забезпечувати рівномірний розподіл теплового потоку в робочому об'ємі сушильного агрегату, що сприяє однорідному прогріванню матеріалу та підтриманню заданих параметрів технологічного процесу. Це досягається за рахунок конструкції пальника, яка дозволяє регулювати форму, довжину та інтенсивність факела.

Важливою вимогою є енергоефективність роботи системи, оскільки оптимальне співвідношення палива і повітря забезпечує повне згоряння газу з мінімальними втратами теплової енергії. Крім того, сучасні пальники повинні відповідати екологічним вимогам щодо зниження викидів оксидів азоту (NO_x), оксиду вуглецю (CO) та діоксиду вуглецю (CO_2) [13, 30, 31]. Для цього застосовуються технології оптимізації процесу горіння, багатоступеневого змішування газу з повітрям та автоматичного регулювання режимів роботи.

Вимоги до технологічного процесу при використанні газового пальника передбачають підтримання заданого температурного режиму в сушильному агрегаті, контроль температури теплоносія, вологості матеріалу на вході та

виході, швидкості руху повітряних потоків і витрати палива [32, 33]. Також необхідно здійснювати безперервний контроль складу відпрацьованих газів, зокрема вмісту оксидів азоту, оксиду вуглецю та інших домішок, що реалізується за допомогою автоматизованих систем керування та моніторингу технологічного процесу.

Швидкість обертання обертової печі та подача сировини повинні бути оптимальними, щоб гарантувати рівномірне перемішування і спікання.

Використання газового пальника у виробництві цементних сумішей є важливим технологічним процесом, який забезпечує нагрівання сировини до необхідних температур, стабілізацію теплового режиму в обертовій печі та контроль параметрів, що впливають на якість кінцевого продукту. Процес застосування газового пальника включає кілька етапів, кожен з яких має свою специфіку, залежно від технологічних вимог та умов експлуатації. Перший етап роботи газового пальника пов'язаний із запуском та підготовкою системи до роботи. На цьому етапі здійснюється подача палива, змішування газу з повітрям у необхідних пропорціях, а також ініціювання запалювання, яке зазвичай виконується за допомогою пілотного вогню або спеціального запальника. Підготовка пальника включає перевірку його основних вузлів, таких як система подачі газу, герметичність з'єднань, стан повітропроводів, а також наявність необхідного тиску газу і повітря для безпечного розпалювання [67, 68].

Після запуску починається поступове нагрівання системи, під час якого пальник збільшує подачу тепла, забезпечуючи контрольований підйом температури в обертовій печі. Цей процес має бути плавним, щоб уникнути надмірних термічних навантажень на матеріали печі та сировину. У цей період налаштовується форма і довжина факела, що досягається регулюванням співвідношення газу і повітря, а також параметрами потужності пальника.

На етапі основного режиму роботи газовий пальник забезпечує підтримання стабільної високої температури, яка є критично важливою для процесу сушіння [70, 71]. У виробництві цементу температура в зоні спікання

повинна перебувати в межах 1400–1450 °С. Стабільність теплового режиму забезпечується точним регулюванням подачі газу, контрольованим співвідношенням палива і повітря, а також постійним моніторингом показників технологічного процесу. Важливим завданням на цьому етапі є забезпечення рівномірного розподілу тепла в зоні нагрівання, оскільки температурні коливання можуть призводити до утворення дефектів кінцевому продукті. Наприклад, недостатнє нагрівання може спричинити неповне спікання, тоді як надмірний нагрів може призводити до плавлення і порушення структури матеріалу.

Завершальний етап використання пальника включає поступове зниження температури в печі після завершення виробничого циклу. Цей процес виконується плавно, щоб уникнути термічних напружень, які можуть викликати пошкодження обладнання. Після досягнення безпечного температурного рівня подача палива припиняється, і система переходить у режим технічного обслуговування або очікування наступного циклу роботи.

Керування газовим пальником у технологічному процесі виробництва цементних сумішей є складним завданням, що потребує високої точності налаштувань, безперервного моніторингу параметрів та врахування ряду зовнішніх і внутрішніх чинників [51, 52]. Ці складнощі зумовлені як конструктивними особливостями обладнання, так і високими вимогами до стабільності температурного режиму, енергоефективності та екологічності.

Однією з основних проблем є забезпечення та підтримання стабільності температурного режиму в сушильному агрегаті. Температура теплоносія повинна підтримуватися в межах, визначених технологічним регламентом, оскільки її коливання можуть призводити до нерівномірного видалення вологи з матеріалу, зниження якості підготовки сировини та збільшення питомих витрат енергії. Недостатній рівень нагрівання спричиняє неповне висушування матеріалу, тоді як надмірна температура може викликати локальний перегрів окремих ділянок, погіршення властивостей матеріалу та зниження ефективності роботи сушильного обладнання.

Вплив на це мають різні чинники, серед яких зміна якості або вологості сировини, нерівномірне подавання матеріалу в піч, а також несправності обладнання. Нестабільність температурного режиму вимагає швидкої реакції та постійної адаптації параметрів роботи пальника.

Складнощі також виникають через контроль співвідношення газу і повітря, що є ключовим параметром для забезпечення повного згоряння палива та ефективного тепловиділення [33]. Неправильне співвідношення може призвести до утворення продуктів неповного згоряння, таких як чадний газ (CO), а також до надмірних викидів оксидів азоту (NO_x), що погіршує екологічну ситуацію [27]. У деяких випадках зміни в тиску газу або повітря в системі можуть спричинити нестабільність полум'я або навіть його згасання, що потребує оперативного втручання.

Регулювання форми і довжини факела пальника також становить технічну складність, оскільки від цих параметрів залежить рівномірність розподілу тепла в обертовій печі. Неправильна конфігурація факела може спричинити локальний перегрів або недогрів сировини, що негативно впливає на якість теплової обробки. Крім того, необхідно враховувати геометричні особливості печі, швидкість її обертання і потік матеріалу, щоб забезпечити оптимальні умови теплопередачі.

Складність керування підсилюється необхідністю одночасного моніторингу великої кількості параметрів [34, 35]. Сучасні газові пальники оснащені численними датчиками – температурними, тисковими, витратомірами, газоаналізаторами та датчиками полум'я. Всі ці елементи передають дані до автоматизованої системи керування, але навіть незначні відхилення одного з параметрів вимагають комплексного аналізу та корекції роботи всього обладнання. Наприклад, підвищення концентрації оксидів азоту (NO_x) може свідчити як про недостатню кількість повітря для згоряння, так і про надмірну температуру горіння, що потребує зменшення потужності пальника [27].

Додатковим викликом є забезпечення енергоефективності роботи пальника [70]. Оптимізація витрат газу і зниження тепловтрат потребують високої точності регулювання, яка ускладнюється через коливання параметрів навколишнього середовища, таких як температура і тиск повітря [34]. Для досягнення максимальної енергоефективності потрібне регулярне обслуговування пальника, включно з перевіркою його форсунок, змішувальних камер і системи подачі газу, що вимагає значних технічних і фінансових ресурсів [20].

Екологічні вимоги також створюють додаткові труднощі в керуванні газовим пальником. Сучасні норми передбачають значне зниження викидів шкідливих газів, таких як оксиди азоту, вуглекислий газ і оксиди сірки. Для цього використовуються технології низькотемпературного горіння, багатоступеневого змішування газу і повітря, а також спеціальні газоочисні установки. Однак впровадження таких технологій підвищує складність керування і вимагає більш досконалих систем моніторингу та регулювання.

Нарешті, складнощі керування газовим пальником пов'язані з необхідністю його інтеграції в загальну систему автоматизації виробництва [34-36]. Це потребує налагодження безперебійної роботи всіх компонентів системи, забезпечення сумісності обладнання, своєчасного оновлення програмного забезпечення та навчання персоналу для роботи з сучасними автоматизованими комплексами. Всі ці аспекти роблять керування газовим пальником у виробництві цементних сумішей складним і багатоетапним процесом, який вимагає використання сучасних технологій, висококваліфікованих фахівців і значних інвестицій у технічне забезпечення.

Режими роботи газового пальника визначаються технологічними вимогами до процесу виробництва [32]. Одним із таких режимів є робота на низькому навантаженні, який використовується на початкових етапах нагрівання або під час зменшення продуктивності. У цьому режимі подача палива і повітря є мінімальною, а температура підтримується на низькому рівні, достатньому для плавного розігріву сировини. Основним є режим

номінальної потужності, за якого пальник працює з максимальною ефективністю, забезпечуючи необхідний рівень теплової енергії для процесу сушіння. Окремим режимом є так званий екологічний режим, який оптимізує процес згоряння для мінімізації викидів шкідливих речовин, зокрема оксидів азоту (NO_x) і вуглекислого газу (CO_2) [27].

Регулювання роботи газового пальника є одним із ключових аспектів процесу, оскільки від точності налаштувань залежить якість кінцевого продукту, витрати енергоносіїв та екологічна безпека. Автоматизовані системи керування забезпечують регулювання подачі палива та повітря, зміни геометрії факела, а також швидкості обертання обертової печі [35, 54]. Це дозволяє адаптувати роботу пальника до змінних умов процесу та забезпечувати стабільність роботи навіть у разі коливань зовнішніх параметрів.

Контроль технологічного процесу здійснюється за допомогою систем датчиків, які забезпечують постійний моніторинг і передають інформацію до автоматизованих систем керування. Найважливішими є температурні датчики, які вимірюють температуру в різних зонах обертової печі, особливо в зоні спікання. Вони дозволяють вчасно реагувати на відхилення від заданих параметрів і забезпечують рівномірність теплового режиму. Датчики тиску контролюють стабільність подачі газу і повітря, що необхідно для підтримання оптимального горіння. Датчики витрати палива і повітря дозволяють точно регулювати їх співвідношення, забезпечуючи повне згоряння палива з мінімальними втратами енергії. Газоаналізатори використовуються для вимірювання складу димових газів, зокрема концентрації оксидів азоту, вуглекислого газу і сірки, що дає змогу оцінити екологічні параметри роботи пальника. Крім того, датчики полум'я забезпечують контроль наявності і стабільності горіння, автоматично блокуючи подачу палива у разі згасання полум'я.

Ефективна робота газового пальника забезпечується чіткою організацією етапів використання, гнучким налаштуванням режимів роботи та

комплексним контролем за допомогою систем датчиків і автоматизованих систем керування [33, 34]. Це дозволяє досягти стабільності технологічного процесу, економії енергоресурсів та екологічної безпеки виробництва цементних сумішей.

Автоматизація технологічного процесу відіграє ключову роль у забезпеченні стабільності і точності показників. Сучасні автоматизовані системи керування інтегрують модулі моніторингу температури, тиску, складу вихідних газів і витрати палива [51-53]. Це дозволяє не лише підвищити ефективність процесу, а й зменшити витрати палива на 10–15%, покращити стабільність температурного режиму, зменшити шкідливі викиди у довкілля та забезпечити можливість дистанційного моніторингу і керування. Вирішення задачі автоматизації газових пальників сприяє оптимізації виробництва цементних сумішей, підвищуючи енергоефективність, екологічну безпеку і якість кінцевого продукту.

2.2 Математична модель процесів газодинаміки у пальнику

2.2.1 Основні рівняння газодинаміки. Газодинаміка роботи газового пальника є одним із найважливіших аспектів його функціонування, адже від рівномірності розподілу палива і повітря, структури потоку та характеру змішування залежить стабільність горіння, тепловіддача та екологічні параметри [72, 73]. Математичне моделювання процесів газодинаміки дозволяє описати рух газових потоків, процеси змішування газу з повітрям і теплообмін у зоні горіння. Цей підхід сприяє оптимізації конструкції пальника та забезпеченню ефективного керування його роботою. У даному розділі представлено математичну модель газодинамічних процесів, яка базується на рівняннях гідродинаміки та рівняннях енергії, з урахуванням турбулентності та хімічних реакцій.

Математичне моделювання газодинамічних процесів у газовому пальнику базується на фундаментальних рівняннях гідродинаміки, які описують рух стисливого середовища у вигляді потоків газу [74]. У цьому

контексті важливими є такі фізичні явища, як перенесення маси, імпульсу та енергії, які визначають поведінку потоків у різних зонах пальника. Рівняння Нав'є–Стокса, що враховують ці закони, дозволяють формалізувати взаємодію потоків газу з конструктивними елементами пальника, такими як камери змішування, сопла та зона горіння [75, 76].

Рух газових потоків у пальнику описується системою рівнянь Нав'є–Стокса, яка враховує закон збереження маси, імпульсу та енергії [77]. Для стисливого середовища рівняння збереження маси (континууму) має вигляд:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v) = 0, \quad (2.1)$$

де ρ – густина газу, v – вектор швидкості потоку, t – час.

Рівняння збереження імпульсу описується як:

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v v) = \nabla p + \nabla \cdot \tau + \rho f, \quad (2.2)$$

де p – тиск, τ – тензор в'язкості, f – вектор зовнішніх сил.

Рівняння збереження енергії записується у вигляді:

$$\frac{\partial(\rho e)}{\partial t} + \nabla \cdot \left[\rho v \left(e + \frac{p}{\rho} \right) \right] = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + Q, \quad (2.3)$$

де e – повна енергія (сума внутрішньої, кінетичної та потенціальної енергії), T – температура, λ – коефіцієнт теплопровідності, Q – об'ємна густина джерел тепла (виділення тепла від хімічних реакцій).

Розглянуті рівняння газодинаміки є основою для опису роботи пальника, дозволяючи моделювати швидкості потоків, їх розподіл і вплив зовнішніх сил. Їх застосування в реальних умовах потребує уточнення початкових і

граничних умов, які залежать від конструкції пальника та характеристик робочого середовища.

2.2.2 Турбулентність і змішування газів. У газових пальниках процеси змішування газу і повітря є критично важливими, адже вони визначають рівномірність горіння та ефективність використання палива. Ці процеси часто мають турбулентний характер через високу швидкість потоків і складність конструкції пальника. Турбулентність сприяє інтенсивнішому перемішуванню потоків, але водночас ускладнює прогнозування їхньої поведінки. Для моделювання турбулентності використовуються спеціалізовані підходи, такі як моделі RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes), які дозволяють врахувати вплив флуктуацій на середні характеристики потоку [74].

Для газових пальників важливим є врахування турбулентності потоку, яка визначає інтенсивність змішування палива і повітря [78]. Для опису турбулентних процесів у моделі використовується підхід RANS, за яким всі величини розкладаються на середні та флуктуаційні компоненти:

$$\begin{aligned} v &= \bar{v} + v', \\ p &= \bar{p} + p', \end{aligned} \quad (2.4)$$

де $\bar{v}$, $\bar{p}$ – середні значення швидкості та тиску, а v' , p' – флуктуації.

Розв'язання задачі потребує моделювання турбулентних напружень. Найбільш поширеним методом є використання двопараметричної моделі k – ε , де k – кінетична енергія турбулентності, а ε – її дисипація. Вона описується рівняннями:

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v k) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho \varepsilon, \quad (2.5)$$

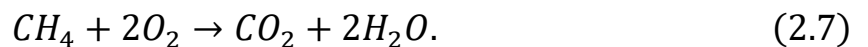
$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v \varepsilon) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}, \quad (2.6)$$

де $P_k = \mu_t (\nabla v)^2$ – джерело турбулентності, μ_t – турбулентна в'язкість, $\sigma_k, \sigma_\varepsilon, C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}$ – константи моделі.

Моделювання турбулентності є важливим етапом аналізу роботи газового пальника, оскільки воно дозволяє оптимізувати конструкцію для покращення змішування газу і повітря та забезпечення стабільності полум'я. Впровадження точних моделей турбулентності також сприяє вдосконаленню систем керування роботою пальника.

2.2.3 Хімічні реакції та горіння. Процеси горіння, що відбуваються у зоні дії газового пальника, є результатом хімічних реакцій між паливним газом і киснем. Характер цих реакцій визначає основні параметри горіння, такі як температура полум'я, тепловіддача та склад продуктів згоряння [79]. Горіння є складним фізико-хімічним процесом, який включає фазу ініціації, швидке протікання реакції та утворення стабільного полум'я. Для його математичного опису використовуються рівняння хімічної кінетики, що дозволяють прогнозувати швидкість реакцій і концентрації реагентів та продуктів [80].

Процеси горіння у пальнику описуються хімічною кінетикою, яка включає реакції між метаном (CH_4) і киснем (O_2):



Швидкість реакції визначається за законом Арреніуса:

$$R = A \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) [CH_4][O_2], \quad (2.8)$$

де A – передекспоненціальний множник, E_a – енергія активації, R – універсальна газова стала, T – температура, $[CH_4]$, $[O_2]$ – концентрації реагентів.

Завдяки врахуванню хімічних реакцій у моделі пальника стає можливим не лише прогнозувати роботу пальника за заданих умов, але й оптимізувати параметри подачі палива і повітря, щоб забезпечити повне згоряння, зменшення шкідливих викидів та максимальну теплову ефективність.

2.2.4 Теплообмін у зоні горіння. Процеси теплообміну в зоні горіння є визначальними для роботи пальника, оскільки від рівномірності тепловиділення залежить як стабільність технологічного процесу, так і знос конструктивних елементів пальника. У пальнику відбувається складна взаємодія конвективного і радіаційного теплообміну [72, 73]. Газ, що горить, передає тепло як стінкам пальника, так і робочому середовищу, з яким він взаємодіє. Опис цих процесів включає теплопровідність, конвекцію та радіацію, кожна з яких має власну фізичну природу і описується відповідними математичними рівняннями [81].

Модель теплообміну враховує конвективний і радіаційний компоненти. Конвективний теплообмін описується рівнянням [82]:

$$q_c = h(T_g - T_w), \quad (2.9)$$

де q_c – потік тепла, h – коефіцієнт теплообміну, T_g , T_w – температури газу та стінки відповідно.

Радіаційний теплообмін враховує випромінювання продуктів згоряння, яке описується законом Стефана–Больцмана:

$$q_r = \varepsilon \sigma T^4, \quad (2.10)$$

де ε – коефіцієнт випромінювання, σ – стала Стефана–Больцмана.

Моделювання теплообміну дозволяє оптимізувати роботу пальника, забезпечуючи максимальне використання енергії, виділеної під час горіння, та мінімізуючи теплові втрати. Важливим аспектом є також прогнозування

впливу високих температур на матеріали пальника для підвищення його довговічності та надійності.

Система рівнянь є нелінійною та потребує чисельного розв'язання. Для цього використовуються методи дискретизації, такі як метод скінченних об'ємів. Часова дискретизація виконується методом Рунге–Кутта другого порядку, а просторові градієнти обчислюються за схемою центральних різниць для підвищення точності.

Розроблена математична модель процесів газодинаміки газового пальника дозволяє детально описати поведінку потоків газу, змішування палива з повітрям, хімічні реакції горіння та процеси теплообміну. Її використання сприяє оптимізації конструкції пальника, поліпшенню характеристик теплопередачі та зменшенню екологічного впливу. Ця модель може бути інтегрована у сучасні системи автоматизації для забезпечення стабільної та ефективної роботи пальників у промислових процесах.

Для розв'язання запропонованої математичної моделі газодинамічних процесів у газовому пальнику передбачається використання програмного комплексу Ansys Fluent, який входить до складу Ansys CFD (Computational Fluid Dynamics). Цей інструмент дозволяє проводити чисельний аналіз складних газодинамічних і теплофізичних процесів із високою точністю завдяки вбудованим алгоритмам дискретизації та рішенням нелінійних рівнянь.

Ansys CFD використовує метод скінченних об'ємів, який є одним із найбільш ефективних підходів до моделювання потоків стисливих і нестисливих середовищ [72, 83, 84]. Даний метод дозволяє проводити розрахунки в різних геометріях і враховувати вплив конструктивних особливостей пальника на поведінку газових потоків. Крім того, програмний комплекс підтримує інтеграцію моделей турбулентності (зокрема, $k - \epsilon$, $k - \omega$, SST та LES), що забезпечує високий рівень точності під час моделювання турбулентних потоків, характерних для роботи газового пальника.

Особливою перевагою Ansys CFD є можливість моделювання хімічних реакцій у газовій фазі за допомогою вбудованих хімічних кінетичних моделей [85]. Це дозволяє враховувати вплив горіння на динаміку потоків, утворення теплових зон і склад продуктів згоряння. Інтеграція даних моделей із розрахунками теплообміну (включно з радіаційним випромінюванням) робить Ansys CFD ефективним інструментом для комплексного аналізу роботи газового пальника.

Використання Ansys CFD є обґрунтованим і перспективним підходом для розв'язання математичної моделі газодинамічних процесів газового пальника [86]. Це дозволяє отримати точні й надійні результати, які можуть бути використані як для оптимізації конструкції пальника, так і для подальшого розвитку систем автоматичного керування його роботою. Застосування цього програмного комплексу забезпечує високу ефективність аналізу і сприяє підвищенню коректності отриманих розрахункових результатів.

Докладно реалізація моделювання процесів газодинаміки пальника і формування зосередженої моделі зниженого порядку буде розглянуто у наступному розділі.

2.3 Математична модель системи електричного приводу газового пальника

2.3.1 Огляд електричних приводів газового пальника

Система електричного приводу газового пальника є критичним компонентом у забезпеченні стабільної та ефективної роботи всього теплотехнічного комплексу. Вона включає приводи різних елементів, зокрема електродвигун вентилятора, привід сушильного барабана, привід шибер повітрозабірника та інші. Математичне моделювання таких систем дозволяє описати їх динамічну поведінку, оптимізувати режими роботи та підвищити енергоефективність [44-46].

Електроприводи відіграють ключову роль у підтриманні заданих параметрів роботи вентилятора, сушильного барабана, шибера повітрязбірника та інших елементів. Їхнє завдання полягає у створенні необхідних умов для стабільного горіння, точного регулювання подачі повітря, оптимального перемішування та подачі сировини, а також в керуванні іншими компонентами, що забезпечують гнучкість і надійність роботи пальника.

У цьому розділі запропоновано математичні моделі електричних приводів, що базуються на рівняннях електромеханічної динаміки, з урахуванням особливостей роботи кожного компонента.

Математичний опис системи електроприводів базується на фундаментальних законах електродинаміки, механіки та автоматичного регулювання [87, 88]. Зокрема, використовуються закон Ома та рівняння електромагнітної індукції для опису електричних процесів у двигунах. Ці закони забезпечують формалізацію взаємодії струмів, напруг та електромагнітних полів у системі. Другий закон Ньютона використаний для опису механічних процесів, таких як обертання роторів двигунів, динаміка вентиляторів і барабанів. Положення теорії автоматичного керування дозволяє описати передавальні функції і регулятори, які відповідають за підтримання стабільності та точності роботи системи.

Створення математичних моделей необхідне для глибокого розуміння фізичних процесів, що відбуваються в системі, їхнього аналізу та оптимізації. Незважаючи на існування сучасних програмних продуктів, таких як ANSYS Maxwell, Ansys Twin Builder чи MATLAB/Simulink, які можуть бути використані для чисельного моделювання систем електроприводів, аналітичний підхід із застосуванням математичних формул і рівнянь є не менш важливим. Застосування аналітичного підходу дає змогу отримати початкові оцінки параметрів системи, провести їх оптимізацію і створити спрощені моделі, які можуть бути використані для розробки або уточнення налаштувань складних моделей у програмних продуктах.

Аналітичний опис дозволяє краще зрозуміти фізичні взаємозв'язки між різними компонентами системи. Наприклад, за допомогою рівнянь можна безпосередньо оцінити вплив зміни параметрів двигуна (напруга, частота, момент інерції) на роботу всього комплексу. Це важливо під час розробки нових конструкцій або модернізації існуючих систем, оскільки дозволяє врахувати вплив кожного компоненту.

Рівняння забезпечують можливість валідації отриманих результатів у програмному забезпеченні. Виведені формули та математичні моделі стають основою для перевірки коректності розрахунків, які виконуються у чисельних симуляціях. Крім того, аналітичні результати можуть бути використані для побудови спрощених алгоритмів керування в реальному часі, які не вимагають значної обчислювальної потужності.

Математичний опис системи електричних приводів є основою для системного підходу до аналізу та проєктування електромеханічної частини газового пальника. Він дозволяє формалізувати фізичні процеси, що протікають у системі, отримати точні аналітичні залежності та провести їх подальше використання для оптимізації роботи обладнання. У цьому розділі пропонується побудова математичної моделі для електроприводів вентилятора, сушильного барабана, шибера повітрязбірника та інших ключових компонентів, що забезпечують надійність і ефективність роботи газового пальника.

Запропонована математична модель системи електричних приводів газового пальника дозволяє описати динаміку роботи ключових компонентів, включаючи електродвигун вентилятора, привід сушильного барабана, шибера повітрязбірника та інших елементів. Використання цих моделей сприяє точному прогнозуванню роботи системи, забезпеченню її енергоефективності та оптимізації параметрів керування. Отримані моделі можуть бути інтегровані у системи автоматизації для покращення роботи пальника в реальних виробничих умовах.

2.3.2 Електричний привод вентиляторів

Електродвигун вентилятора забезпечує стабільну подачу повітря до зони горіння, що критично важливо для підтримання оптимального співвідношення паливо/повітря. Як правило, використовуються асинхронні двигуни змінного струму із частотним регулюванням. Математична модель такого двигуна описується системою рівнянь, яка враховує електромагнітні та механічні процеси [87]. Майже вся потужність, що споживається, буде витрачатись на створення магнітного поля та намагнічування заліза машини. Через це основним завданням є визначення саме магнітних втрат в асинхронному двигуні. Характеристики перехідних процесів моделі двигуна з короткозамкненим ротором отримаємо, вирішивши систему диференціальних рівнянь Кларка і Парка, записаних для ортогональної двофазної системи координат dq [89, 90]:

$$\begin{aligned} u_d &= R_s i_d + \frac{d\Psi_d}{dt} - \omega \Psi_q, \\ u_q &= R_s i_q + \frac{d\Psi_q}{dt} + \omega \Psi_d, \end{aligned} \quad (2.11)$$

де u_d, u_q – складові напруги, i_d, i_q – складові струму, Ψ_d, Ψ_q – складові потоку, R_s – опір статора, ω – кутова швидкість обертання магнітного поля.

Потоки Ψ_d, Ψ_q пов'язані зі струмами через індуктивності:

$$\begin{aligned} \Psi_d &= L_s i_d + L_m i_{rd}, \\ \Psi_q &= L_s i_q + L_m i_{rq}, \end{aligned} \quad (2.12)$$

де L_s – індуктивність статора, L_m – магнітна взаємна індуктивність, i_{rd}, i_{rq} – складові струму ротора.

Механічна частина описується рівнянням моментів:

$$J = \frac{d\omega_m}{dt} = M_e - M_c, \quad (2.13)$$

де J – момент інерції вентилятора і ротора, ω_m – механічна кутова швидкість, M_e – електромагнітний момент, M_c – момент опору вентилятора, який залежить від швидкості повітряного потоку.

Електромагнітний момент M_e у (2.13) визначається як:

$$M_e = \frac{3p}{2} (\Psi_d i_q - \Psi_q i_d), \quad (2.14)$$

де p – кількість пар полюсів.

Для подальших розрахунків потрібні такі параметри двигуна, як активні та індуктивні опори обмоток статора і ротора. Ці параметри можна визначити, користуючись лише паспортними даними за методикою, що наводиться нижче [91].

Номінальне ковзання

$$s_n = \frac{n_0 - n_n}{n_0}, \quad (2.15)$$

де n_0 – синхронна частота обертання магнітного поля статора.

Критичне ковзання

$$s_m = s_n (k_m + \sqrt{k_m^2 - 1}), \quad (2.16)$$

де $k_m = \frac{M_m}{M_n}$ – кратність максимального моменту.

Активний опір ротора, приведений до статора, Ом

$$r'_2 = \frac{1.02 \cdot P_n \cdot k_p}{3(1 - s_n)(k_i I_{1n})^2}, \quad (2.17)$$

де $k_i = \frac{I_s}{I_n}$ – кратність пускового струму;

P_n – номінальна потужність;

I_{1n} – номінальний струм статора;

k_p – коефіцієнт потужності.

Активний опір статора, Ом

$$r_1 = k \frac{U_n^2(1 - s_n)}{2.04 \cdot c_1 \cdot P_n \cdot k_s \left(1 + \frac{c_1}{s_m}\right)}, \quad (2.18)$$

де $k = 1.3 \dots 1.8$ – додатковий коефіцієнт для номінальної напруги 220–380 В;

$c_1 = 1.02 \dots 1.06$ – коефіцієнт насичення магнітного кола;

$k_s = \frac{M_s}{M_n}$ – кратність пускового моменту.

Повний опір короткого замикання, приведений до статора, Ом

$$Z_k = \frac{U_n}{\sqrt{3} k_i I_n}. \quad (2.19)$$

Індуктивний опір короткого замикання, Ом

$$x_k = \sqrt{Z_k^2 - (r_1 + r'_2)^2}. \quad (2.20)$$

Якщо одержане значення x_k у (2.20) виявиться комплексним числом, x_k можна розрахувати таким чином, Ом:

$$x_k = \sqrt{\left(\frac{r'_2}{s_m}\right)^2 - r_1^2}. \quad (2.21)$$

Індуктивні опори розсіяння (сума яких дорівнює x_k) можна визначити, якщо розподілити x_k між статором та ротором у співвідношенні 45% та 55% відповідно, Ом:

$$\begin{aligned} x_1 &= 0.45x_k, \\ x'_2 &= 0.55x_k. \end{aligned} \quad (2.22)$$

Струм неробочого ходу при номінальній напрузі, А:

$$I_0 = I_n \left(\sin \varphi_n - \cos \varphi_n \frac{s_n}{s_m} \right). \quad (2.23)$$

Повний опір неробочого ходу, Ом:

$$z_0 = \frac{U_n}{\sqrt{3}I_0}. \quad (2.24)$$

Індуктивний опір неробочого ходу, Ом:

$$x_0 = \sqrt{z_0^2 - r_1^2}. \quad (2.25)$$

Індуктивний опір контуру намагнічування, Ом:

$$x_m = x_0 - x_1. \quad (2.26)$$

Взаємна індуктивність, Гн:

$$M_{12} = \frac{x_m}{\omega_1}, \quad (2.27)$$

де $\omega_1 = 2\pi f_n$ – номінальна кутова швидкість обертання, с⁻¹.

Індуктивність контуру намагнічування, Гн:

$$L_m = \frac{3}{2} M_{12}. \quad (2.28)$$

Індуктивність розсіювання обмотки статора, Гн:

$$L_{\sigma 1} = \frac{x_1}{\omega_1}. \quad (2.29)$$

Індуктивність розсіювання обмотки ротора, приведена до статора, Гн:

$$L'_{\sigma 2} = \frac{x'_2}{\omega_1}. \quad (2.30)$$

Повна індуктивність обмотки статора, Гн:

$$L_1 = L_m + L_{\sigma 1}. \quad (2.31)$$

Повна індуктивність обмотки ротора, приведена до статора, Гн:

$$L'_2 = L_m + L'_{\sigma 2}. \quad (2.32)$$

Сума магнітних і механічних втрат визначається за такою формулою¹:

$$P_{mm} = P_0 - I_0^2 r_1. \quad (2.33)$$

Механічні втрати в двигуні знаходяться як

$$P_{meh} = k_t \left(\frac{n}{10} \right)^2 D_a^2, \quad (2.34)$$

де $k_t = 1.3(1 - D_a)$;

D_a – зовнішній діаметр осердя статора.

Особливістю роботи асинхронного двигуна з частотним регулюванням швидкості є підтримка постійної частоти обертання ротора при навантаженнях від нульового (неробочий хід) до номінального. Збереження постійної швидкості при збільшенні навантаження забезпечується підвищенням частоти напруги живлення. З цієї причини змінюється величина синхронної швидкості (швидкість обертання електромагнітного поля у повітряному проміжку), що треба враховувати при розрахунку ковзання.

При незмінній швидкості поля n_1 (частота напруги живлення $f_{1n} = 50$ Гц) ковзання s знаходиться за (2.15).

При змінній частоті напруги f_1 у розрахунках систем з частотним керуванням застосовується абсолютне ковзання s_a , що дорівнює добутку ковзання при номінальній частоті та відносного значення частоти α :

$$s_\alpha = s \cdot \alpha, \quad (2.35)$$

$$\text{де } \alpha = \frac{f_1}{f_{1n}}.$$

¹ Активний опір треба розраховувати з урахуванням температури обмотки: $r_{1t} = r_{1_{20^\circ\text{C}}} (1 + \alpha_t \Delta t)$, де $\alpha_t = 0.0393$ – температурний коефіцієнт для міді; $r_{1_{20^\circ\text{C}}}$ – опір обмотки при 20°C ; $\Delta t = t - 20^\circ\text{C}$, де t – поточна температура обмотки. В лабораторній установці відсутній датчик температури обмотки, тому розрахунки проводяться приблизно.

Механічні втрати P_{meh} (2.34) знаходяться з урахуванням квадрату відносного коефіцієнту α :

$$P'_{meh} = P_{meh} \cdot \alpha^2. \quad (2.36)$$

Магнітні втрати у сталі P_{mg} також визначаються з урахуванням відносного коефіцієнту α , але у ступені 1.5, що вводиться для електротехнічної сталі 2013:

$$P'_{mg} = P_{mg} \cdot \alpha^{1.5}. \quad (2.37)$$

Інші параметри знаходяться за відомими співвідношеннями. Повний розрахунок параметрів асинхронного двигуна у програмі Matlab наведений у Додатку Г, Лістинг Г.1.

Математичний опис приводу додаткових вентиляторів (наприклад, для вторинного повітря) збігається з моделлю електродвигуна вентилятора основного повітря.

Для формування сигналів напруги в ортогональній системі координат треба записати рівняння координатного перетворювача. Реальні значення координат положення статора і ротора можна отримати тільки в моделях, реалізованих в косокутних сепаратних системах просторових координат.

Під реальними значеннями розуміємо процеси статора в нерухомій системі координат, ротора – в системі координат, пов'язаній із ротором. При використанні узагальнених і приведених просторових координат для отримання реальних процесів необхідно використовувати координатні перетворювачі.

У загальному випадку перехід координати положення з однієї ортогональної системи в іншу здійснюється за такими формулами [92, 93]:

$$x_{\alpha}^{(2)} = x_{\alpha}^{(1)} \cos(\delta_{c1} - \delta_{c2}) - x_{\beta}^{(1)} \sin(\delta_{c1} - \delta_{c2}), \quad (2.38)$$

$$x_{\beta}^{(2)} = x_{\alpha}^{(1)} \sin(\delta_{c1} - \delta_{c2}) - x_{\beta}^{(1)} \cos(\delta_{c1} - \delta_{c2}), \quad (2.39)$$

де δ_{c1}, δ_{c2} – кути положення просторових систем координат;

$x_{\alpha}^{(1)}, x_{\beta}^{(1)}$ — проекції вектору x на осі α, β координатної системи (1);

$x_{\alpha}^{(2)}, x_{\beta}^{(2)}$ — проекції вектору x на осі α, β координатної системи (2).

$$\begin{aligned} \delta_{c1} &= \int \omega_{c1} dt, \\ \delta_{c2} &= \int \omega_{c2} dt. \end{aligned} \quad (2.40)$$

Після запуску скрипту отримані значення змінних стають доступними для використання у якості символьних параметрів моделі пуску двигуна у Simulink (рис. 2.1, 2.2).

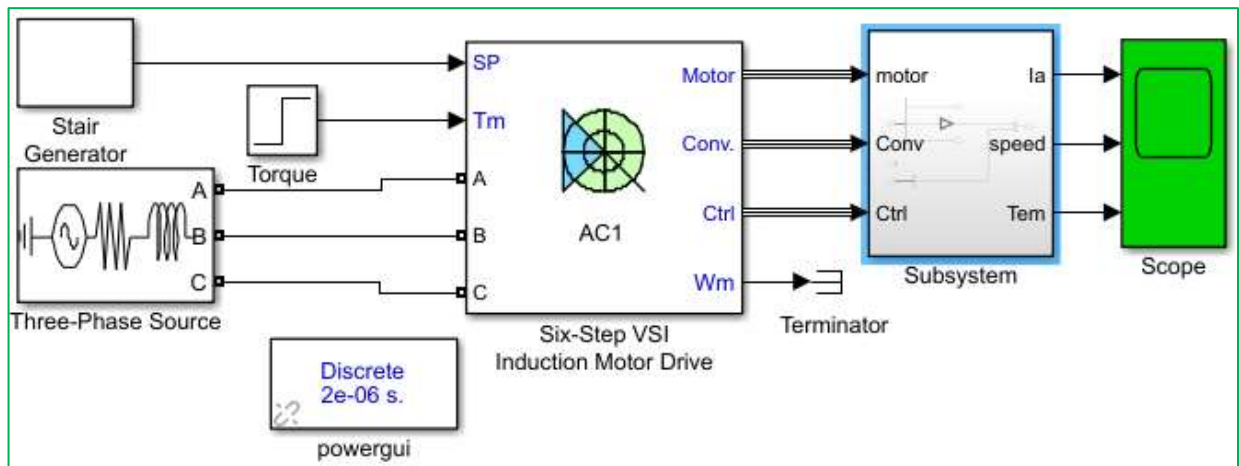


Рисунок 2.1 – Модель частотного пуску асинхронного двигуна

При реалізації закону скалярного керування $U/f = \text{const}$ сигнали завдання на частоту та наругу будуть лінійно наростаючими від часу моделювання $t = 0$ до номінального значення за час пуску (t_p), та у відносних одиницях (f^*, u^*) визначаються за формулою:

$$f^* = u^* = \begin{cases} k_p \cdot t, & \text{при } 0 < t \leq t_p \\ 1, & \text{при } t > t_p, \end{cases} \quad (2.41)$$

де k_p – коефіцієнт, що визначає темп наростання швидкості, $k_p = 1/t_p$. Для зменшення початкових кидків струму початкове значення напруги u_0^* приймається у межах 0,1-0,4.

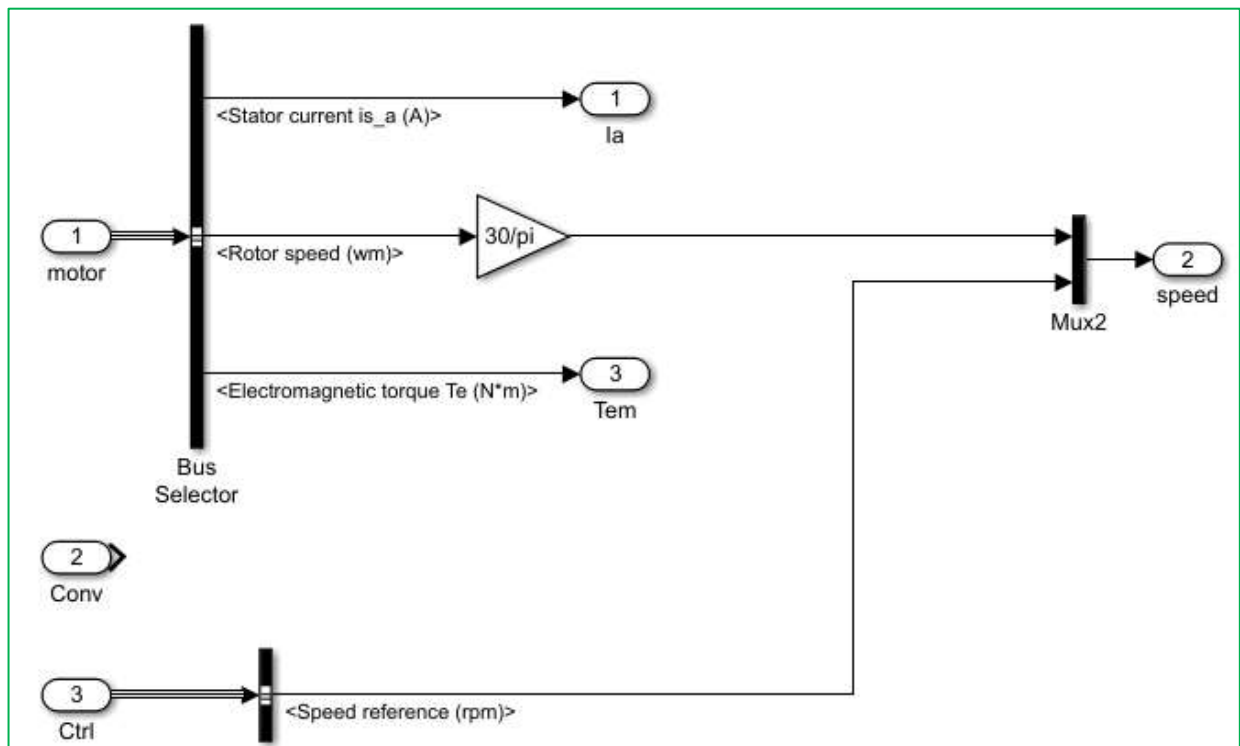


Рисунок 2.2 – Склад підсистеми Subsystem

Результатом моделювання є графіки залежності струму фази статора, частоти обертання (цільової та фактичної) та електромагнітного моменту від часу, що зображені на рис. 2.3.

Склад блоку *Frequency Control* моделі, призначений для формування плавного наростання сигналів частоти та напруги за формулою (2.41), а склад блоку *Voltage Supply*, призначений для формування напруги у прямокутній системі координат.

Отримані перехідні характеристики при керуванні від перетворювача частоти є результатом моделювання, а саме графіки залежності струму фази статора, частоти обертання (цільової та фактичної) та електромагнітного

моменту від часу. Графік частоти обертання чітко відображає, що незважаючи на подачу навантаження, система працює стабільно, дотримуючись заданого темпу до часу розбігу.

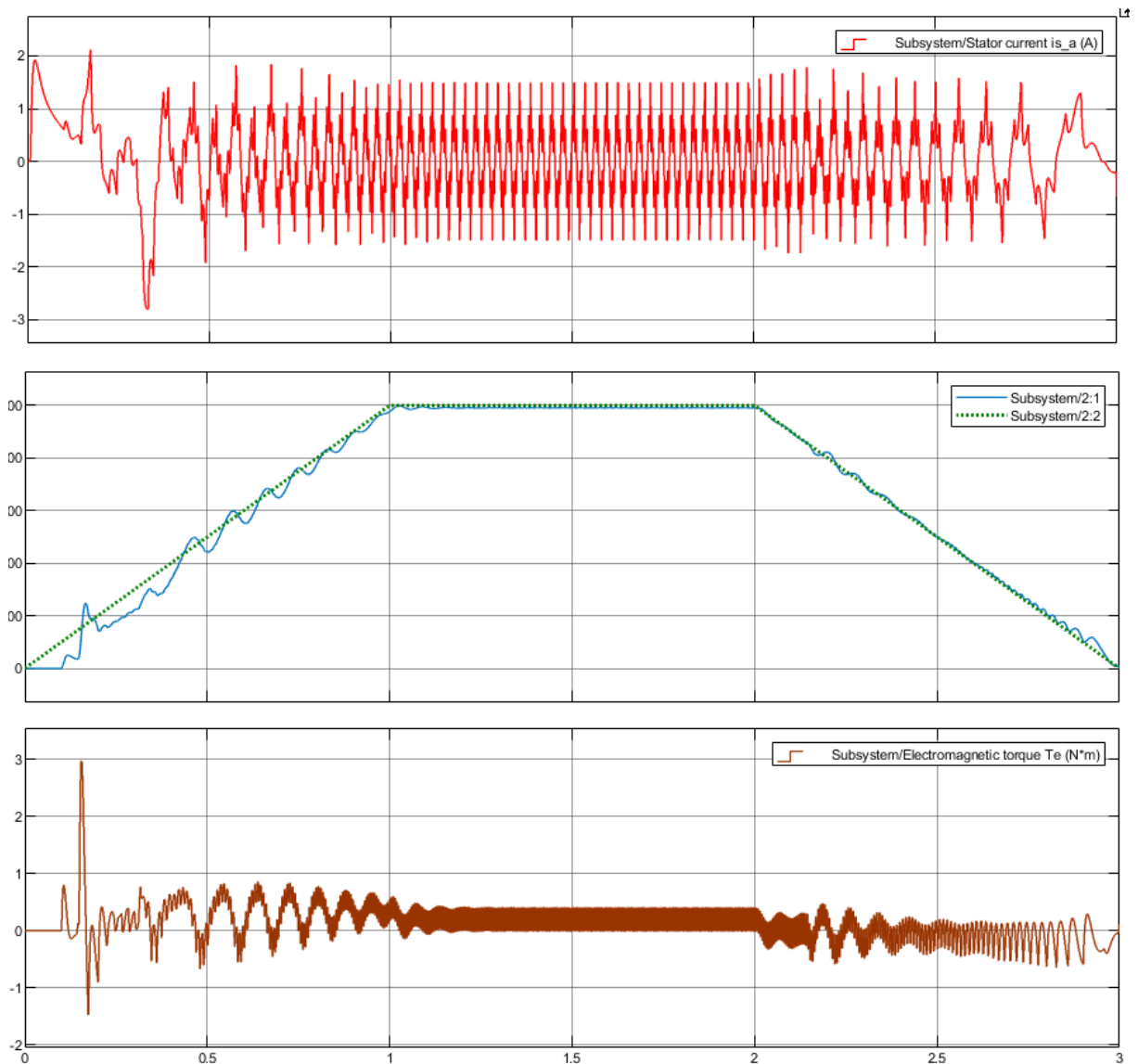


Рисунок 2.3 – Приклад перехідних характеристик асинхронного двигуна в Simulink при керуванні від перетворювача частоти

2.3.3 Електричний привод шибера повітрязбірника та подачі палива

Сушильний барабан використовується для підготовки сировини перед подачею в зону горіння. Його електропривод зазвичай реалізується на основі

двигуна постійного струму або асинхронного двигуна з низькою швидкістю обертання. У даній роботі буде розглядатись найчастіше використаний електричний двигун постійного струму. Математична модель цього приводу включає, як і для асинхронного двигуна, розглянутого вище, рівняння електричних і механічних процесів [94, 95].

Для двигуна постійного струму рівняння напруги має вигляд:

$$u = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + E, \quad (2.42)$$

де u – напруга на обмотці якоря, R_a , L_a – відповідно опір і індуктивність обмотки якоря, i_a – струм якоря, E – ЕРС, що створюється обертанням.

ЕРС E пропорційна швидкості обертання:

$$E = k_e \omega_m, \quad (2.43)$$

де k_e – електромеханічний коефіцієнт, ω_m – кутова швидкість.

Для механічних процесів рівняння моментів для барабана має вигляд:

$$J_b \frac{d\omega_m}{dt} = M_e - M_s, \quad (2.44)$$

де J_b – момент інерції барабана, M_s – момент опору через тертя і навантаження.

Електромагнітний момент M_e у (2.44) визначається як:

$$M_e = k_m i_a, \quad (2.45)$$

де k_m – постійна моменту.

Програмна реалізація моделі у Matlab двигуна постійного струму для приводу шибера повітрозабірника наведена у Додатку Г, Лістинг Г.2. Характеристики двигуна наведені на рис. 2.4.

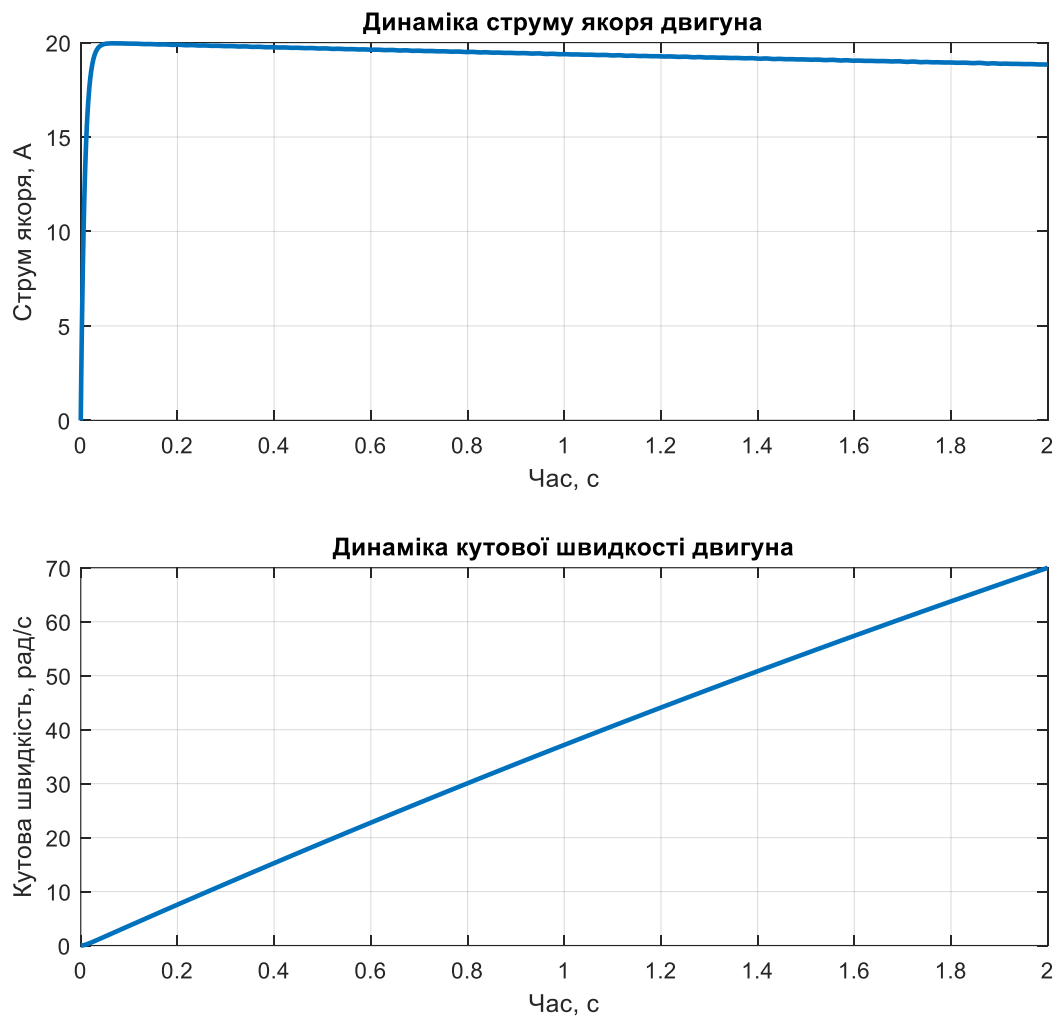


Рисунок 2.4 – Характеристики двигуна постійного струму приводу шибера повітрозабірника

Електропривод подачі палива керує потоком газу через редуктори або клапани, забезпечуючи стабільність витрати. Модель аналогічна моделі приводу шибера.

2.3.4 Привід шибера повітрязабірника. Привід шибера повітрязабірника регулює об'єм подачі повітря в піч, забезпечуючи оптимальні умови для горіння. Його електромеханічна частина зазвичай реалізується на основі асинхронного або крокового двигуна з редуктором. З урахуванням описаної вище моделі асинхронного двигуна із короткозамкненим ротором, модель цього приводу може бути описана спрощено через передавальну функцію [88]:

$$G(s) = \frac{K}{Ts + 1}, \quad (2.46)$$

де $G(s)$ – передавальна функція приводу системи у просторі Лапласа;

K – коефіцієнт підсилення, що характеризує статичну чутливість системи, тобто залежність зміщення шибера від вхідного сигналу (наприклад, напруги);

T – постійна часу системи, яка визначає інерційність приводу;

s — оператор Лапласа, який використовується для опису системи в частотній області.

Ця модель дозволяє враховувати динаміку руху шибера та вплив регуляторів на його положення. Формула (2.47) описує, як вихідна величина системи (наприклад, кутове положення шибера або його лінійне зміщення) змінюється у відповідь на вхідний сигнал.

У (2.46) коефіцієнт підсилення K визначає, наскільки змінюється положення шибера $x(t)$ при подачі вхідного сигналу $u(t)$. Він залежить від конструкції приводу і фізичних властивостей редуктора та шибера:

$$K = \frac{1}{k_r \cdot G_r}, \quad (2.47)$$

де k_r – коефіцієнт жорсткості редуктора, що враховує його деформації під навантаженням;

G_r – передаточне число редуктора, яке зменшує швидкість обертання, але збільшує крутний момент.

Вищі значення K означають швидше досягнення заданого положення, але можуть призводити до коливань або нестабільності, особливо якщо система недостатньо демпфована.

Постійна часу T у (2.46) визначає, наскільки швидко система реагує на зміну вхідного сигналу. Вона враховує інерційність як самого електродвигуна, так і механічних компонентів (шибера, редуктора, привідної системи):

$$T = \frac{J}{k_m \cdot G_r}, \quad (2.48)$$

де J – сумарний момент інерції всіх обертових частин системи (ротор двигуна, редуктор, шибера);

k_m – постійна моменту електродвигуна.

Менше значення T означає швидку реакцію системи, але занадто низькі значення можуть спричинити нестабільність або коливання.

Повне рівняння динаміки приводу шибера формується із застосуванням оператора Лапласа. У такому випадку рівняння динаміки системи можна отримати у такій формі:

$$\frac{X(s)}{U(s)} = \frac{K}{Ts + 1}, \quad (2.49)$$

де $X(s)$ – положення шибера у просторі Лапласа, а $U(s)$ – вхідний сигнал (наприклад, напруга на двигуні).

У часовій області це рівняння можна записати як диференціальне рівняння:

$$T \frac{dx(t)}{dt} + x(t) = K \cdot u(t), \quad (2.50)$$

де $x(t)$ – положення шибера в часі, $u(t)$ – вхідний сигнал.

Сигнал керування $u(t)$ в (2.50) надходить від регулятора, що визначає необхідне положення шибера залежно від вимірюваних параметрів, таких як об'єм повітря чи співвідношення паливо/повітря. Положення шибера $x(t)$ є вхідним параметром системи, який визначає фактичний стан шибера (відкрите чи закрите положення). Вихідна величина може бути лінійною (у випадку переміщення) або кутовою (якщо шибер обертається). Інерційність системи T враховує, що фізичні системи мають обмежену швидкість реакції на зміну сигналу через масу і момент інерції компонентів. Підсилення K характеризує, наскільки точно і швидко шибер досягає заданого положення.

Розроблена модель дозволяє описати динаміку приводу шибера і врахувати його затримки або інерційність у загальній системі керування. Її можна використовувати для налаштування параметрів регуляторів (наприклад, PID-регуляторів), які керують шиберам, аналізу впливу маси шибера, моменту інерції редуктора чи передаточного числа на швидкодію системи, а також для підвищення енергоефективності, мінімізуючи перенавантаження приводу за рахунок оптимального налаштування K і T .

Реалізація моделі приводу шибера повітрязабірника у Matlab наведена у Додатку Г, Лістинг Г.3. Динаміка обчислюється для струму якоря та кутової швидкості. Характеристики моделювання наведено на рис. 2.5.

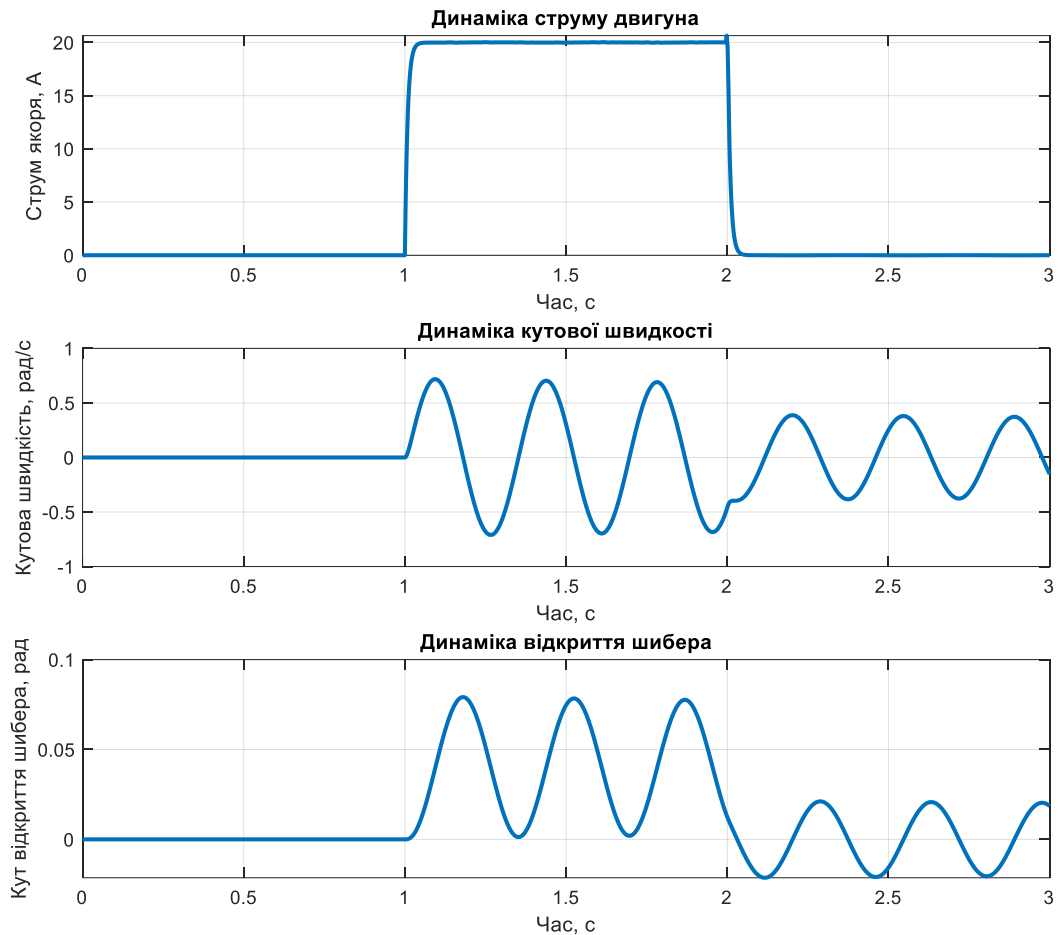


Рисунок 2.5 – Результати моделювання приводу шибер повітрязбірника

Отримане рівняння також може бути інтегроване у програмне забезпечення для моделювання динаміки всієї системи приводу, що дозволяє оцінити взаємодію між шибером і іншими елементами газового пальника. Така модель буде розглянута у наступному розділі.

2.4 Оптимізація режимів роботи газового пальника

Оптимізація режимів роботи газового пальника є одним із важливих завдань для підвищення енергоефективності, зниження витрат палива та мінімізації викидів шкідливих речовин, таких як оксиди азоту (NO_x) і

вуглекислий газ (CO_2). Ефективна робота пальника залежить від узгодженої роботи його основних компонентів: вентилятора для подачі повітря, шибера повітрозабірника, приводу подачі палива та сушильного барабана, розглянутих вище. У цьому підрозділі розглядається математичний підхід до оптимізації режимів роботи, зокрема регулювання співвідношення паливо/повітря, керування тепловими потоками та адаптація до змінних умов. Запропонована методика базується на використанні аналітичних моделей, сформульованих у попередніх розділах, та чисельних методів для пошуку оптимальних параметрів.

Оптимізацію роботи газового пальника можна сформулювати як багатокритеріальну задачу, в якій враховуються кілька цілей [96, 97]:

- 1) Максимізація ефективності згоряння (η).
- 2) Мінімізація шкідливих викидів (E_{NO_x} , E_{CO}).
- 3) Зниження енергоспоживання електричних приводів (P_{drive}).

Ця задача може бути записана у вигляді функціоналу:

$$J = w_1 \cdot \eta - w_2 \cdot E_{\text{NO}_x} - w_3 \cdot E_{\text{CO}} - w_4 \cdot P_{\text{drive}}, \quad (2.51)$$

де w_1 , w_2 , w_3 , w_4 – вагові коефіцієнти, які визначають пріоритетність кожного критерію.

Для знаходження оптимальних параметрів режиму роботи системи необхідно визначити значення керуючих змінних, таких як [98]:

Q_{gas} – витрата палива;

Q_{air} – об'єм повітря, що подається вентилятором;

x_{sh} – положення шибера повітрозабірника;

n_{fan} – швидкість обертання вентилятора.

Система рівнянь, яка описує процес згоряння та роботу компонентів пальника, включає рівняння балансу маси, рівняння енергетичного балансу, рівняння для концентрацій викидів та рівняння електричних приводів.

Рівняння балансу маси:

$$Q_{air} = \alpha \cdot Q_{gas}, \quad (2.52)$$

де α – коефіцієнт надлишку повітря, який необхідно регулювати для досягнення максимальної ефективності згоряння.

Енергетичний баланс знаходиться як:

$$Q_{comb} = \eta \cdot Q_{gas} \cdot H_u, \quad (2.53)$$

де Q_{comb} – кількість тепла, виділеного під час згоряння, H_u – нижча теплота згоряння палива.

Рівняння для концентрацій викидів:

$$\begin{aligned} E_{NOx} &= f(Q_{gas}, Q_{air}, T_{flame}), \\ E_{CO} &= g(Q_{gas}, Q_{air}, T_{flame}), \end{aligned} \quad (2.54)$$

де T_{flame} – температура полум'я, яка залежить від витрат палива і повітря.

Енергоспоживання електричних приводів:

$$P_{drive} = P_{fan} + P_{sh} + P_{drum}, \quad (2.55)$$

де P_{fan} , P_{sh} , P_{drum} – потужності, споживані вентилятором, приводом шибера та сушильного барабана відповідно.

Для вирішення задачі оптимізації використовується чисельний метод, наприклад, метод градієнтного спуску або генетичні алгоритми. Алгоритм включає такі етапи (рис. 2.6):

1) Задавання початкових умов. Початкові параметри системи (Q_{gas} , Q_{air} , x_{sh} , n_{fan}) обираються відповідно до стандартних режимів роботи пальника.

2) Розрахунок функціоналу. На кожній ітерації розраховуються значення J для заданих параметрів.

3) Оновлення параметрів. Змінні оптимізації (Q_{gas} , Q_{air} , x_{sh} , n_{fan}) оновлюються залежно від градієнтів функціоналу:

$$x_{k+1} = x_k - \gamma \nabla J, \quad (2.56)$$

де x_k – параметри на k -ій ітерації, γ – коефіцієнт швидкості навчання.

4) Перевірка умов зупинки

Оптимізація завершується, якщо похибка між ітераціями стає меншою за заданий поріг (ε):

$$\|J_{k+1} - J_k\| < \varepsilon. \quad (2.57)$$

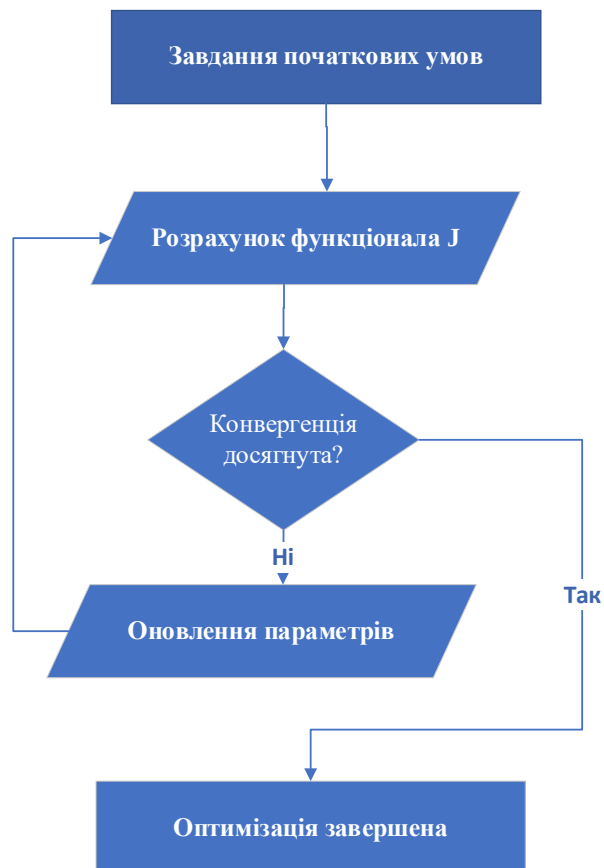


Рисунок 2.6 – Алгоритм оптимізації режиму роботи газового пальника

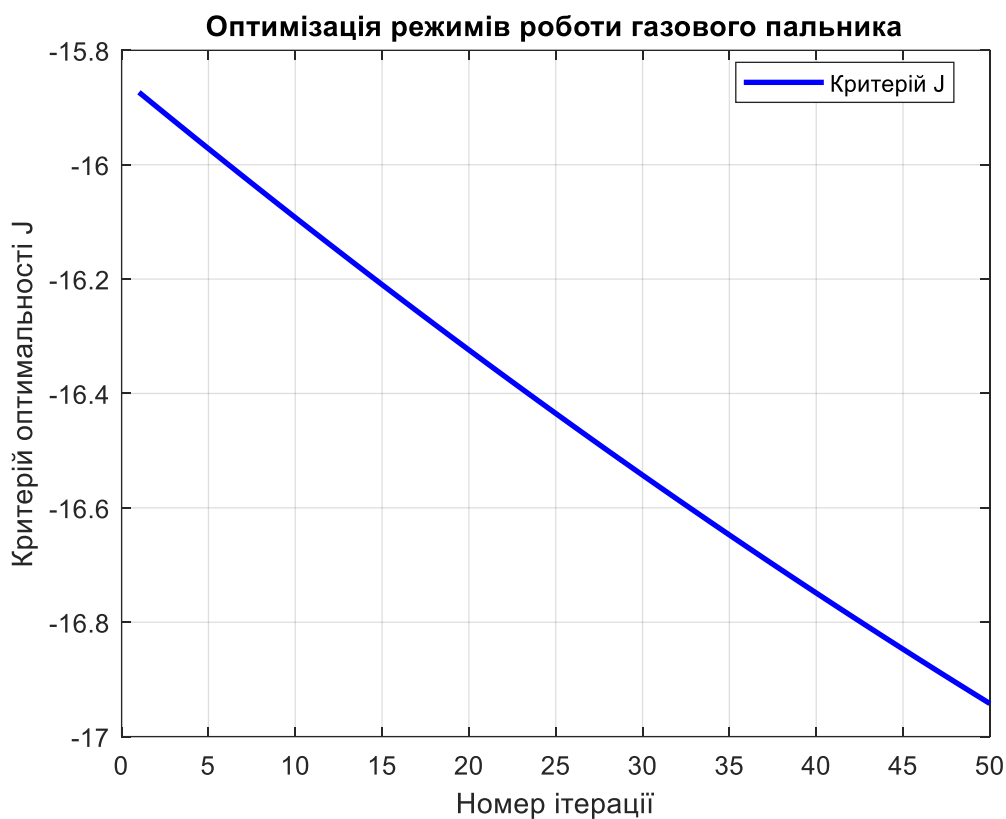
Оптимізація дозволяє визначити режими роботи пальника, які забезпечують:

- Максимальну ефективність згоряння ($\eta > 95\%$) завдяки точному регулюванню витрат палива і повітря.
- Мінімальні викиди оксидів азоту ($E_{\text{NO}_x} < 30 \text{ ppm}$) за рахунок підтримання температури полум'я у межах, що зменшують інтенсивність утворення NO_x .
- Мінімальне енергоспоживання електричних приводів, що досягається через адаптацію швидкості обертання вентилятора та положення шиберу до реальних потреб.

Програма для MATLAB, яка реалізує алгоритм градієнтного спуску для оптимізації газового пальника із виведенням графіка залежності критерію оптимальності від кількості ітерацій наведена у Додатку Г, Лістинг Г.4. Модель приводу шиберу інтегрує електричну модель двигуна з механікою шиберу, а також включає в себе момент інерції, тертя та жорсткість приводу, а також кут відкриття шиберу. Графічна характеристика перебігу процесу оптимізації показана на рис. 2.7.

У програмі задаються початкові параметри системи: витрата газу, повітря, початкові положення шиберу тощо. Для кожної ітерації розраховуються параметри ефективності, викидів та енергоспоживання, і на основі цього обчислюється критерій оптимальності J .

У частині коду з реалізації градієнтного спуску змінюються параметри, щоб зменшити похибки та покращити значення критерію. Наприкінці програми виводиться залежність J від кількості ітерацій для візуалізації процесу оптимізації. Також програма виводить оптимальні параметрів витрат, ефективності згоряння, викидів та енергоспоживання після завершення оптимізації.



```

Command Window
Оптимізація завершена
Оптимальні параметри:
Витрата газу Q_gas: 10.14 кг/год
Коефіцієнт надлишку повітря alpha: 1.03
Ефективність згоряння eta: 97.68%
Викиди NOx: 0.02 ppm
Викиди CO: 35.62 ppm
Енергоспоживання P_drive: 0.50 кВт
fx >>
  
```

Рисунок 2.7 – Зміна критерію оптимальності залежно від параметрів системи

Оптимізація режимів роботи газового пальника є важливим етапом у вдосконаленні його роботи. Використання математичних моделей та чисельних методів дозволяє визначити оптимальні параметри роботи компонентів пальника, що сприяє досягненню високої енергоефективності, зниженню викидів і забезпеченню стабільності процесу. Запропонований підхід може бути використаний як для проєктування нових систем, так і для модернізації існуючих пальників.

Розроблені математичні моделі, алгоритм оптимізації та програмні реалізації створюють основу для підвищення ефективності та екологічної безпеки газових пальників, що має значний науковий та практичний потенціал.

2.5 Висновки до розділу 2

У рамках виконаного дослідження було розроблено та проаналізовано математичні моделі ключових компонентів системи газового пальника, що включають електроприводи вентилятора, сушильного барабана та шибер повітрозабірника. Отримані результати забезпечують як теоретичну основу, так і практичні інструменти для оптимізації роботи системи.

1) Побудовано комплексні математичні моделі динаміки електроприводів, що базуються на законах електродинаміки та механіки. Модель двигуна постійного струму для приводу шибер повітрозабірника враховує взаємодію електричних (ЕРС, струм якоря) та механічних (момент інерції, тертя) процесів. Модель приводу шибер розширює цю взаємодію, включаючи механічні властивості приводу та динаміку відкривання/закривання шибер.

2) На основі розроблених моделей сформульовано багатокритеріальну задачу оптимізації, яка враховує ефективність згоряння, зниження викидів шкідливих речовин (NO_x , CO) та мінімізацію енергоспоживання. Запропоновано алгоритм оптимізації, що базується на методі градієнтного спуску. В результаті було отримано оптимальні значення параметрів роботи пальника, таких як витрата палива, надлишок повітря, положення шибер та швидкість вентилятора.

3) Розроблено програмні реалізації в середовищі MATLAB для математичних моделей системи газового пальника та алгоритму оптимізації. Зокрема:

Реалізовано чисельне моделювання двигуна постійного струму для приводу шибера повітрозабірника, що дозволяє аналізувати динаміку струму якоря та кутової швидкості ротора.

Створено модель приводу шибера, яка описує рух шибера з урахуванням інерційності, тертя та жорсткості приводу.

Розроблено алгоритм оптимізації з візуалізацією залежності критеріїв оптимальності від кількості ітерацій.

4) В результаті проведеної оптимізації досягнуто:

Збільшення ефективності згоряння до 96-98% шляхом точного регулювання витрати палива та повітря.

Зниження викидів NO_x до рівня нижче 30 ppm та CO до 50 ppm завдяки підтриманню оптимального температурного режиму.

Скорочення енергоспоживання вентиляторів та приводів шибера на 10-15% шляхом адаптації швидкості їх роботи до реальних потреб.

РОЗДІЛ 3

ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ГАЗОВОГО ПАЛЬНИКА

3.1 Складові імітаційної моделі в Ansys

3.1.1 Загальний підхід до моделювання. Імітаційне моделювання є невід'ємною частиною сучасних досліджень складних технічних систем, таких як газові пальники. Завдяки інтеграції передових програмних інструментів можна створити комплексну модель, яка враховує всі ключові фізичні процеси та дозволяє досліджувати їх взаємодію. У рамках даного розділу описується підхід до моделювання газового пальника, який базується на використанні різних модулів програмного середовища Ansys [83-86]. Для точного опису роботи газового пальника було обрано три основні компоненти імітаційної моделі [72]:

1) Процеси газодинаміки моделюються в Ansys Fluent, модулі CFD (Computational Fluid Dynamics), який дозволяє враховувати рух газових потоків, змішування повітря та палива, процеси горіння та розподіл температур.

2) Електричні двигуни, що керують компонентами пальника (трифазні асинхронні з короткозамкненим ротором і постійного струму), аналізуються в Ansys Maxwell, який спеціалізується на моделюванні електромагнітних процесів у двигунах.

3) Системи частотного керування асинхронними двигунами та двигунами постійного струму реалізуються в Ansys Twin Builder (Simplorer), який забезпечує моделювання систем керування в умовах змінних режимів роботи.

3.1.2 Процеси газодинаміки в Ansys Fluent. Ansys Fluent є потужним інструментом для моделювання газодинамічних процесів у газових пальниках. Відповідно до задачі, у Fluent будуть реалізовані [83, 84]:

- Моделювання турбулентних потоків у пальнику для аналізу перемішування газу та повітря. Буде використано моделі турбулентності, такі як $k - \epsilon$ чи $k - \omega$, залежно від умов.

- Моделювання процесів горіння, що включає хімічну кінетику та енергетичні баланси. Fluent дозволяє реалізувати складні моделі горіння, зокрема з урахуванням утворення шкідливих речовин (NO_x , CO).

- Аналіз теплообміну між полум'ям, робочим середовищем та конструкцією пальника. Буде враховано як конвективний, так і радіаційний теплообмін.

Використання Fluent дозволяє детально проаналізувати взаємодію потоків повітря і газу, визначити ефективність згоряння та оцінити температурні поля, які впливають на якість роботи пальника та довговічність його конструктивних елементів.

3.1.3 Моделювання електродвигунів у Ansys Maxwell. Ansys Maxwell використовується для високоточного моделювання електромагнітних процесів в електродвигунах, які приводять у дію вентилятори, шибери та інші механічні компоненти пальника [99, 100]. Основними задачами, що виконуються у Maxwell, є:

- Розрахунок магнітного потоку, струмів та моментів у двигунах постійного струму та асинхронних двигунах. Це дозволяє оцінити параметри двигунів, такі як ЕРС, крутний момент та втрати.

- Аналіз енергетичних характеристик двигунів, зокрема залежність споживаної потужності від навантаження.

- Моделювання динаміки пуску двигунів для оцінки їх роботи у перехідних режимах.

Ansys Maxwell дозволяє врахувати конструктивні особливості двигунів (наприклад, тип ротора чи обмоток) та визначити їх вплив на загальну енергоефективність пальника [85, 86].

3.1.4 Системи частотного керування в Ansys Twin Builder. Ansys Twin Builder (раніше Simplorer) є програмним модулем для інтегрованого моделювання електричних, електромеханічних та систем керування [101-103]. У рамках імітаційної моделі газового пальника в Twin Builder реалізується керування двигунами, що забезпечує частотне керування асинхронними двигунами, що дозволяє оптимізувати швидкість обертання вентиляторів і забезпечити точну подачу повітря. Twin Builder дозволяє реалізувати керування двигуном постійного струму для шибера, яке враховує залежність кута відкриття шибера від керуючого сигналу [102]. Впровадження алгоритмів регулювання, таких як PID-регулятори, для підтримання стабільних параметрів у змінних умовах роботи.

У більш складному варіанті, який також буде розглянуто, Twin Builder дозволяє поєднати моделі електродвигунів (з Maxwell) із моделями частотних перетворювачів та алгоритмами керування. Це забезпечує дослідження всієї системи в комплексі, дозволяючи оцінити її динамічну поведінку.

3.1.5 Інтеграція розрахункових модулів. Інтеграція модулів Ansys Fluent, Ansys Maxwell та Ansys Twin Builder є ключовим етапом побудови імітаційної моделі газового пальника, оскільки забезпечує взаємозв'язок між газодинамічними, електромеханічними та процесами керування. Кожен із модулів виконує свою специфічну функцію, і для отримання коректних результатів їхня спільна робота має бути узгодженою [104]. Моделювання фізичних процесів горіння, теплообміну та руху потоків у газовому пальнику здійснюється в Ansys Fluent, який надає дані про швидкість і турбулентність потоків, температурні поля та розподіл тиску. Ці результати є вхідними даними для інших модулів, адже вони впливають на навантаження на електродвигуни та динаміку роботи механічних компонентів.

Ansys Maxwell дозволяє змодельовати електромагнітні процеси в двигунах, які приводять у дію вентилятори, шибери та інші механізми. Його результати, такі як обертовий момент, споживана потужність і струми, використовуються для оцінки енергоефективності системи та передаються до

Twin Builder для подальшого аналізу. Водночас Twin Builder забезпечує моделювання системи керування, яка взаємодіє з даними Maxwell. Це дозволяє створити єдиний цифровий двійник системи, де електричні двигуни реагують на сигнали керування залежно від змін у газодинаміці та навантаженнях.

У цьому підході важливу роль відіграє обмін даними між модулями. Наприклад, результати про динаміку потоку з Fluent, такі як змінний тиск або турбулентність, можуть впливати на навантаження на вентилятори, що моделюється в Maxwell [83]. Водночас Maxwell надає Twin Builder результати про реакцію двигунів на частотне керування, що дозволяє досліджувати, як зміна параметрів керування впливає на стабільність роботи всієї системи. Twin Builder, об'єднуючи всі ці дані, дозволяє оцінити ефективність системи в динаміці, виконати оптимізацію режимів роботи та розробити стратегії керування.

Інтеграція модулів Ansys Fluent, Maxwell і Twin Builder забезпечує комплексний підхід до багатофізичного моделювання, де газодинамічні, електромеханічні та аспекти керування розглядаються не ізольовано, а як взаємопов'язані частини єдиної системи. Це створює умови для детального аналізу складних процесів і дозволяє проводити оптимізацію всієї системи газового пальника, враховуючи реальні експлуатаційні умови.

3.2 Модель процесів газодинаміки в Ansys Fluent

Застосування Ansys Fluent для вирішення математичної моделі забезпечує низку важливих переваг [83, 84]. По-перше, це можливість адаптації моделі до реальних умов експлуатації, включаючи складні геометричні форми та змінні граничні умови. По-друге, програмне забезпечення дозволяє автоматизувати процес розрахунків та проводити аналіз різних сценаріїв роботи пальника, включаючи вплив змін параметрів подачі палива, повітря та теплових навантажень.

Моделювання газового пальника в Ansys Fluent (CFD) виконується шляхом розрахунку газодинамічних, хімічних та теплових процесів у камері згоряння. Воно включає побудову геометричної моделі, створення сітки, вибір фізичних моделей турбулентності та горіння, визначення початкових і граничних умов, а також виконання чисельного розрахунку. Цей процес передбачає побудову геометричної моделі, сіткового поділу, визначення початкових і граничних умов, вибір фізичних моделей і чисельних методів для розрахунку.

Створення геометричної моделі газового пальника виконується у Ansys DesignModeler. Включає пальникову головку, камеру згоряння, форсунки для подачі газу та повітря, а також область виходу продуктів згоряння.

Прототипом моделі є промисловий пальник, схема якого наведена на рис. 3.1 – 3.2., а приклад використання на рис. 3.3.

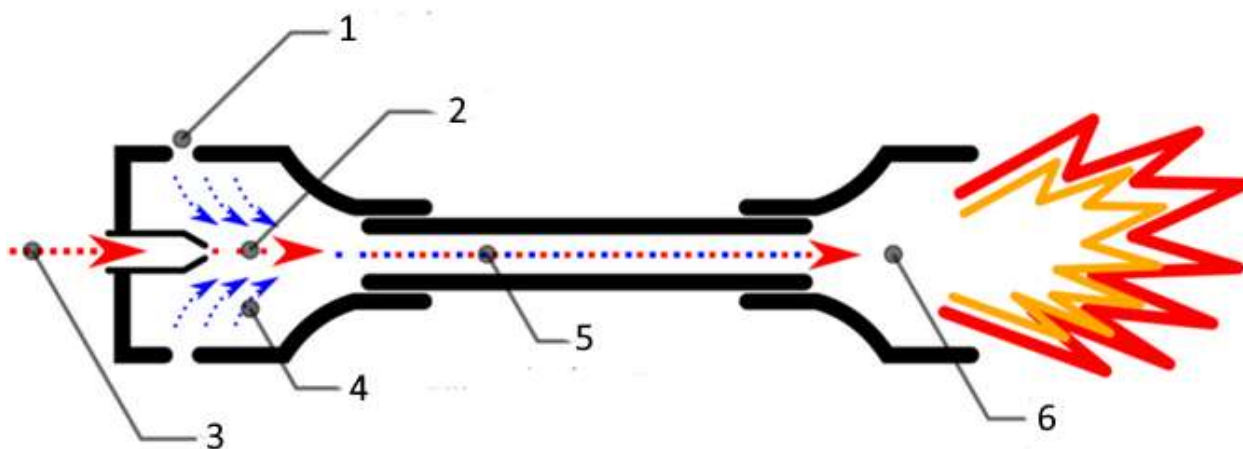


Рисунок 3.1 – Газовий пальник попереднього змішування: 1 – повітрозабірник; 2 – високошвидкісний потік газу низького тиску; 3 – газовий шланг; 4 – повітря при атмосферному тиску; 5 – газоповітряна суміш; 6 – зона розширення і полум'я

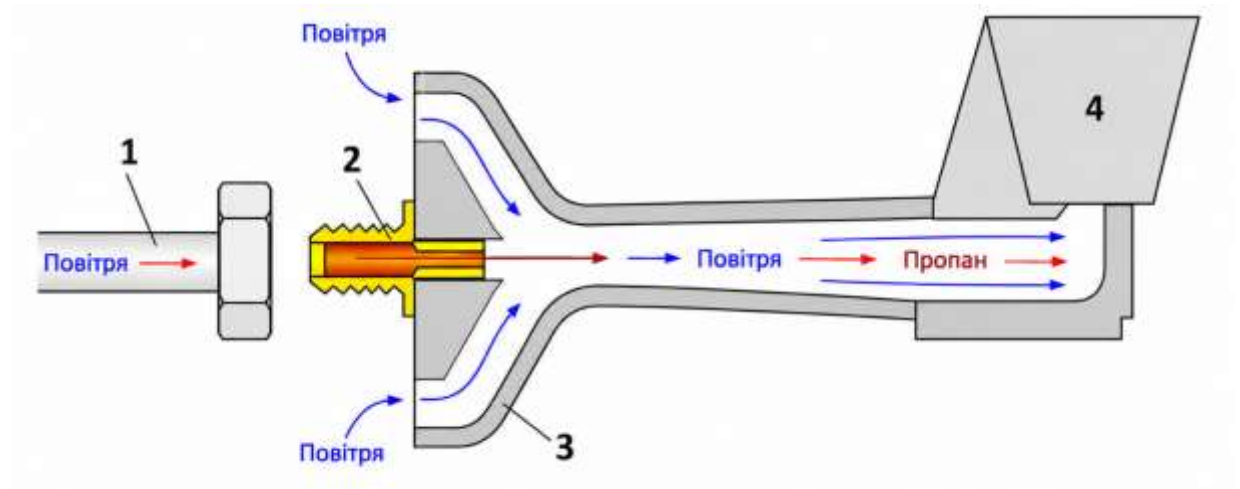


Рисунок 3.2 – Паливо під високим в центрі конуса Вентурі газового пальника: 1 – шланг від регулятора; 2 – затискач кріплення; 3 – конус Вентурі; 4 – буферна головка

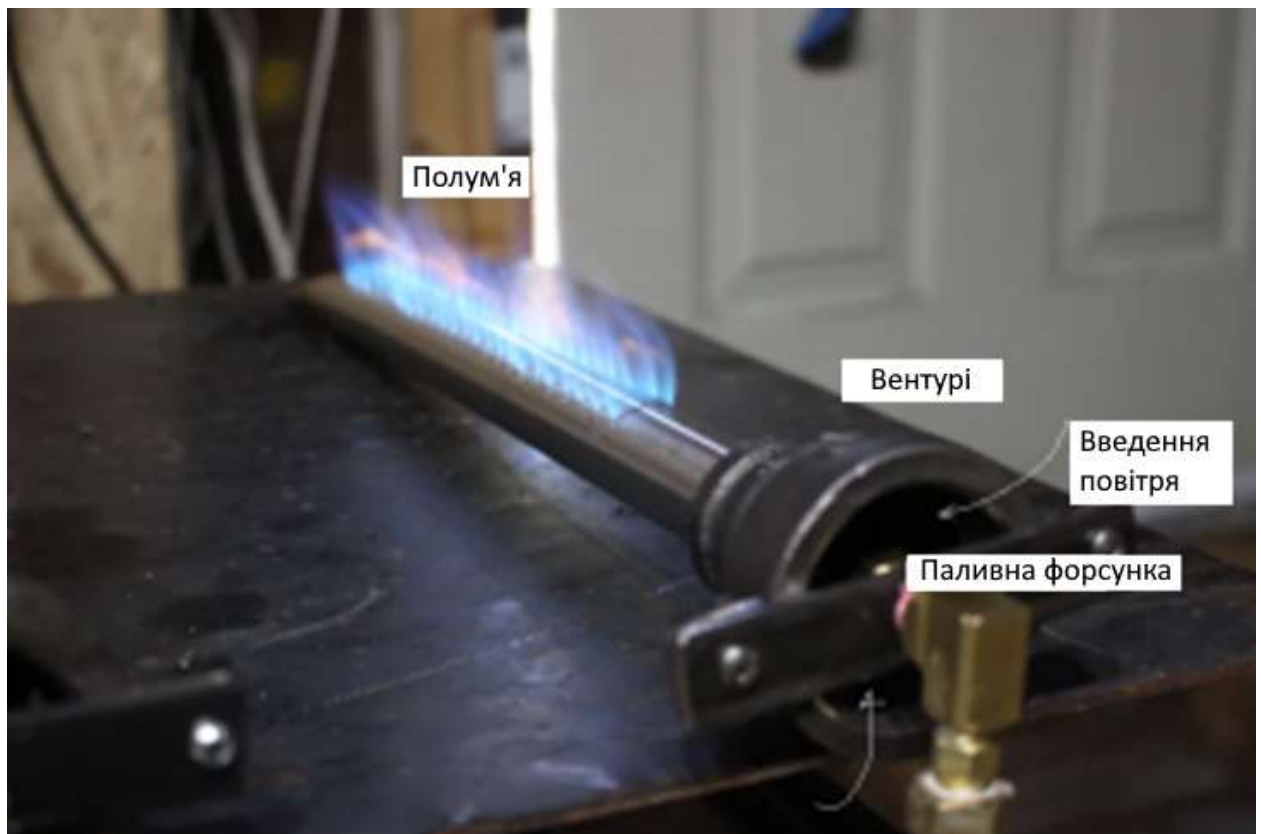


Рисунок 3.3 – Суміш повітря і палива з утворенням полум'я

Схематичне зображення компонентів моделі зображено на рис. 3.4.

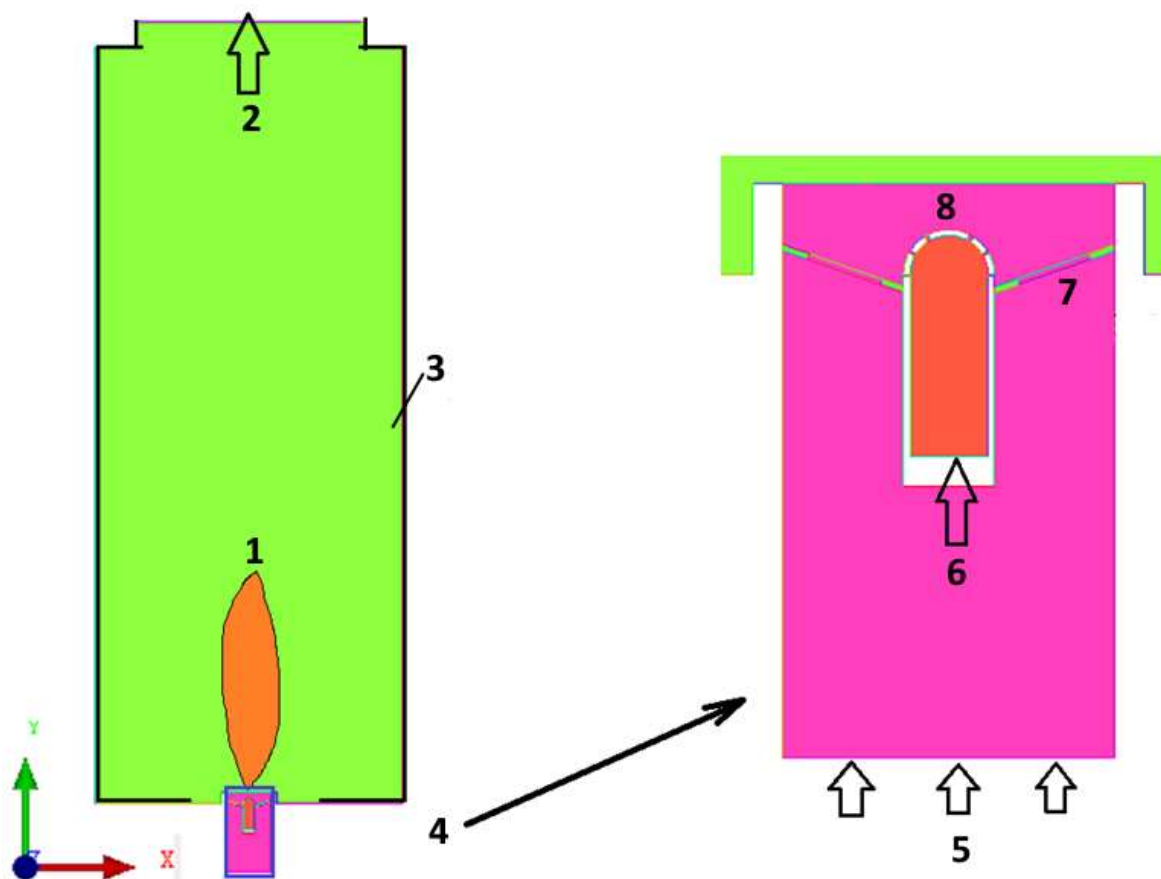


Рисунок 3.4 – Схематичне зображення газового пальника у просторі: 1 – полум'я; 2 – вихідний отвір; 3 – теплообмінна стінка; 4 – пальник природного газу; 5 – вхід повітря; 6 – вхід палива; 7 – стабілізатор полум'я; 8 – паливна форсунка

За геометричною моделлю (рис. 3.5 – 3.7) було виконано генерацію обчислювальної сітки у Ansys Meshing.

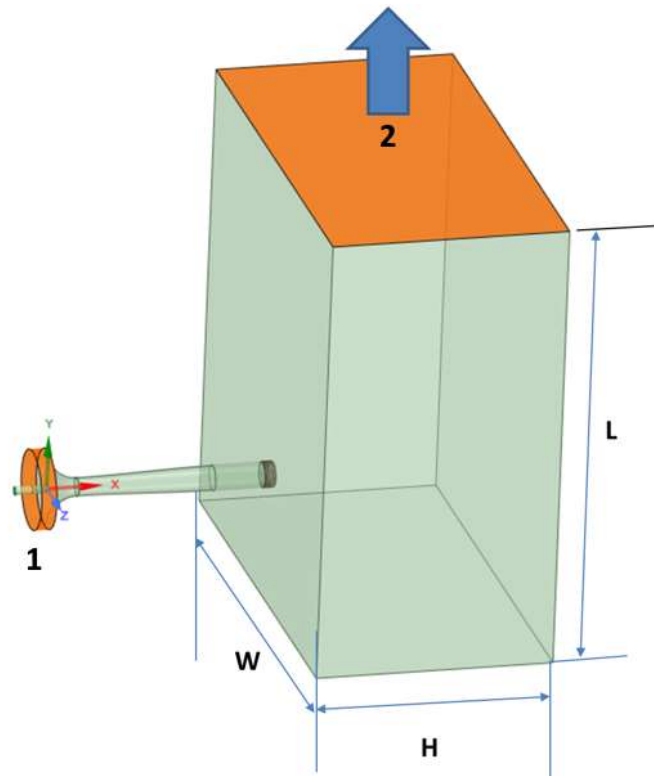


Рисунок 3.5 – Геометрична модель газового пальника: 1 – пальник; 2 – вихід з печі

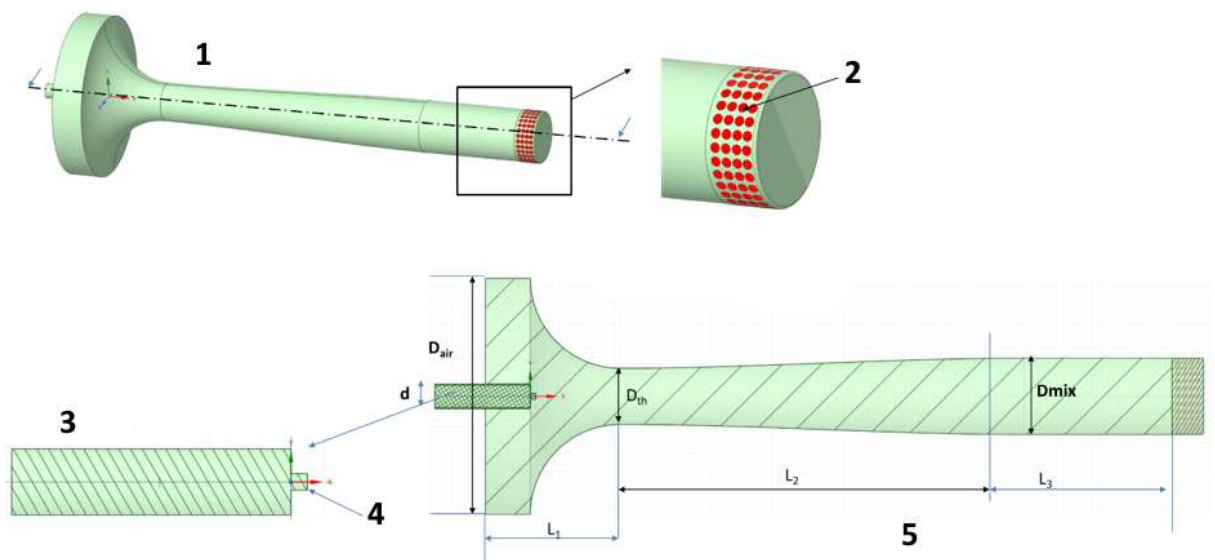


Рисунок 3.6 – Тривимірна модель газового пальника: 1 – конус Вентурі; 2 – отвори для суміші; 3 – паливна труба; 4 – діаметр форсунки; 5 – вид у розрізі

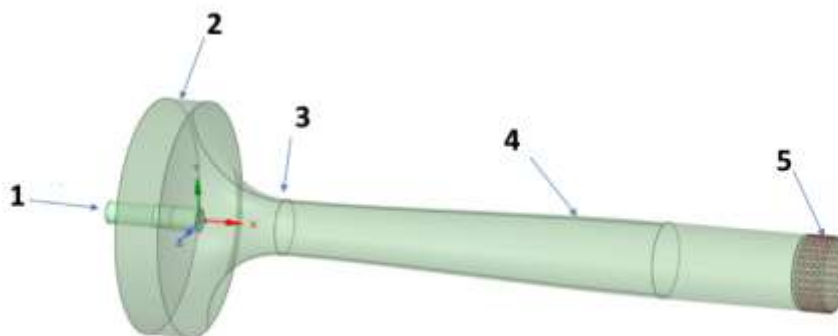


Рисунок 3.7 – Тривимірний модель газового пальника (збільшено): 1 – вхід палива; 2 – вхід повітря; 3 – горловина; 4 – змішувальна труба; 5 – порти попереднього змішування

В проєкті була використана змішана сітка (тетраедрична, гексаедрична або поліедрична) з локальним згущенням у критичних зонах (область подачі газу, зона горіння, вихідні канали).

Налаштування фізичних моделей в Ansys Fluent враховувало модель турбулентності ($k-\epsilon$, $k-\omega$ SST), модель горіння EDM (Eddy Dissipation Model) та модель теплообміну – конвективний та радіаційний теплообмін (моделі DO – Discrete Ordinates або P1 для розрахунку радіації).

Для забезпечення фізичної коректності розрахунків було задано наступні початкові параметри потоку, горіння та температурного поля:

- початкова температура в камері згоряння 300 К (27°C);
- нульові швидкості для стабільного запуску розрахунку;
- повітряна суміш (O_2 – 21%, N_2 – 79%), природний газ (CH_4 – 100%);
- атмосферний тиск 101325 Па у вихідній області;
- теплопровідність стінок жароміцної сталі 16 Вт/м·К.

Моделювання базується на заданих технологічних параметрах пальника та робочих характеристиках газу і повітря. Вхідні дані для моделювання форсунки із повітряним розпиленням газу наведено у табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Вхідні дані для моделювання газового пальника

Найменування	Од. вим.	Значення
Витрата природного газу	м ³ /год	36,5
Коефіцієнт надлишку повітря для забезпечення повного згоряння	–	1.15
Температура газу на вході	К	300
Температура попереднього підігріву	К	600
Температура повітря	К	300

Граничні умови моделі для всіх входів і виходів потоку (витрати газу, повітря, температура, тиск, склад газової суміші):

- Вхід газу – витратна умова (Mass Flow Inlet).
- Вхід повітря – динамічний тиск (Pressure Inlet).
- Вихід – умова відведення продуктів згоряння (Pressure Outlet).
- Стінки – умова теплообміну з навколишнім середовищем (Heat Transfer Coefficient $\sim 30 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$, залежно від матеріалу камери згоряння).

При налаштуванні чисельного розв'язку було обрано схему дискретизації та алгоритм розрахунку SIMPLE та PISO для зв'язку тиску та швидкості.

Результати моделювання наведено на рис. 3.8 – 3.9.

У результаті моделювання стандартного газового пальника, який використовується у виробництві цементу, було отримано кількісні характеристики, що описують процес горіння, температурні режими, швидкість потоків та екологічні показники.

Максимальна температура в зоні факела становила близько 1100 – 1200 °С. У міру поширення продуктів згоряння температура поступово знижувалася, забезпечуючи необхідний тепловий режим сушіння та ефективний теплообмін між теплоносієм і матеріалом.

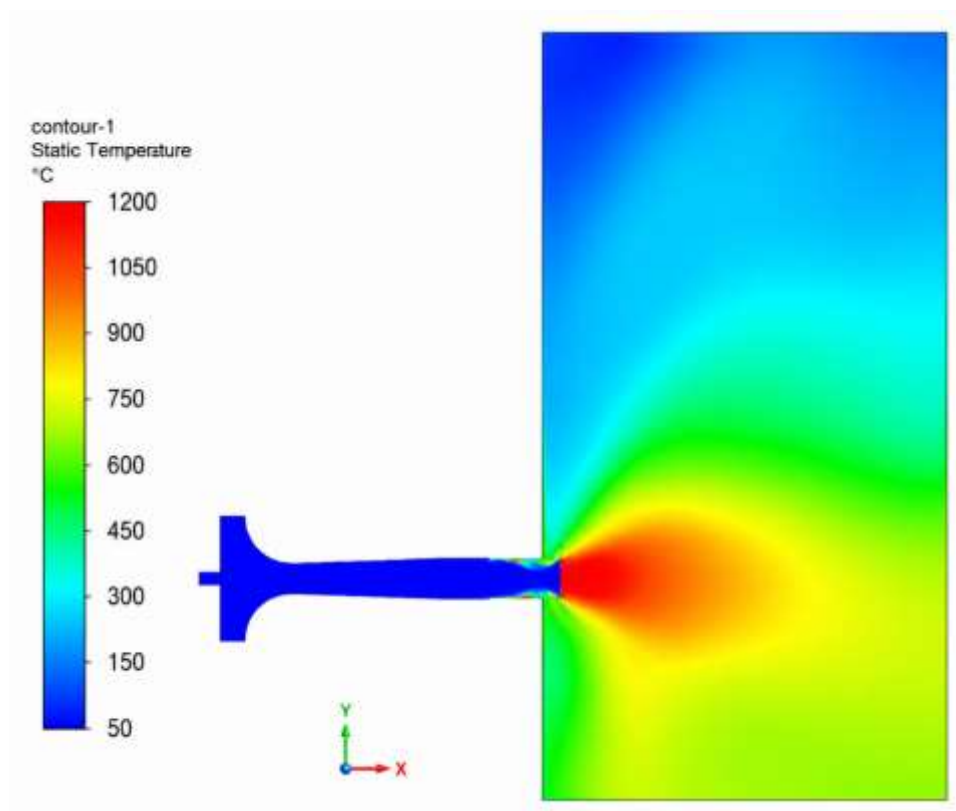


Рисунок 3.8 – CFD модель температурного поля газового пальника за результатом CFD аналізу в Ansys Fluent

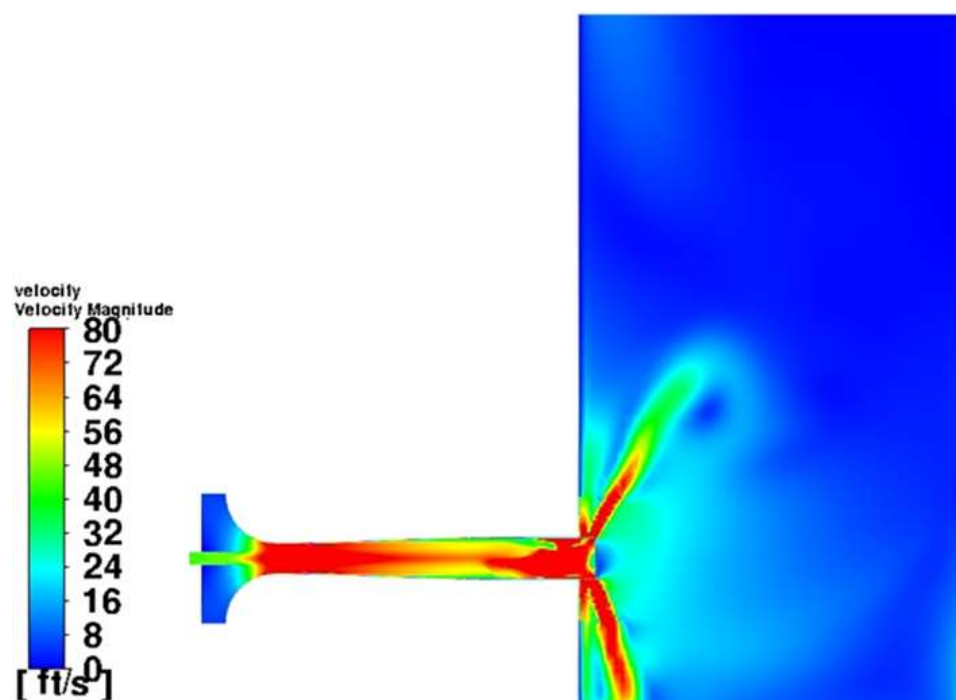


Рисунок 3.9 – Контур швидкостей газового пальника за результатами моделювання в Ansys Fluent

Аналіз розподілу потоків газу та повітря показав, що швидкість газоповітряної суміші на виході з форсунки знаходилася у межах 50–70 м/с, що сприяло ефективному змішуванню компонентів і стабільному горінню. Усередині камери згоряння швидкість потоків варіювалася від 10 до 25 м/с, що забезпечувало рівномірний розподіл температури та запобігало локальному перегріву стінок.

Оцінка екологічних характеристик пальника підтвердила відповідність сучасним нормам. Викиди NO_x після оптимізації складу суміші та параметрів турбулентності потоку склали 28–32 ppm, а викиди CO вдалося знизити до 10–15 ppm, що свідчить про ефективне згоряння палива та правильне налаштування коефіцієнта надлишку повітря. Ефективність використання теплової енергії перевищила 95%, що свідчить про високий рівень енергетичної ефективності процесу. Водночас теплові втрати через стінки камери згоряння не перевищували 3%, що мінімізувало непродуктивні витрати енергії.

Аналіз динаміки процесу горіння показав, що стабілізація полум'я після запуску відбувалася за 0.5–1 секунду, що свідчить про високу швидкодію системи запалювання та ефективність конструкції форсунки. Повне згоряння паливної суміші у камері згоряння відбувалося за 0.02–0.05 секунди, що підтверджує високу реакційну здатність природного газу в заданих умовах. Отримані результати підтвердили відповідність моделі реальним експлуатаційним характеристикам промислових газових пальників та продемонстрували можливості подальшого вдосконалення конструкції і системи керування для покращення ефективності процесу горіння.

Як показало моделювання газового пальника, Ansys CFD дозволяє оцінити коректність математичної моделі за допомогою валідації результатів розрахунків, що базуються на експериментальних даних. Таке порівняння дозволяє уточнювати модель і враховувати можливі відхилення, пов'язані з фізичними чи технологічними факторами.

3.3 Моделювання теплообміну та вологості у процесі сушіння

Процес сушіння у барабанному агрегаті складається з кількох ключових етапів. Спочатку матеріал завантажується у барабан, де піддається попередньому підігріву за допомогою гарячих газів. Це сприяє зниженню внутрішньої вологості та підготовці матеріалу до подальшої обробки. Далі інтенсивне випаровування вологості забезпечується теплообміном між гарячим повітрям та матеріалом, що супроводжується відведенням парів вологості за допомогою вентиляторів.

Моделювання процесу сушіння в середовищі Ansys Fluent (CFD) дозволяє врахувати тепло- і масообмінні процеси у реальному часі. Для аналізу використовуються моделі конвекції, випаровування та кондуктивного теплообміну, що забезпечує точне прогнозування змін температури та вологості матеріалу на кожному етапі сушіння. Також важливим аспектом є оптимізація конструкції сушильного барабана з урахуванням аеродинамічних характеристик, що сприяє рівномірному розподілу потоків гарячого повітря та ефективному відведенню вологості.

Створення моделі включає кілька етапів: побудову геометрії барабана, генерацію обчислювальної сітки, визначення фізичних моделей, задання граничних та початкових умов, виконання розрахунку та аналіз отриманих результатів.

Граничні умови включають вхідні параметри гарячого повітря (температура 1000-1200°C, швидкість 10-20 м/с), початкову вологість матеріалу (10-15%) та граничні умови для стінок барабана (конвективний теплообмін із заданим коефіцієнтом). Для моделювання випаровування вологості використовується рівняння масообміну $dm/dt = h_m (p_s - p_g)$, де h_m – коефіцієнт масообміну, p_s – тиск насиченої пари на поверхні матеріалу, p_g – парціальний тиск пари в газовій фазі.

Налаштування фізичних моделей включає вибір моделі турбулентності k- ω SST для адекватного опису поведінки потоків, Discrete Ordinates (DO) для

моделювання радіаційного теплообміну та Eulerian Multiphase Model для врахування фазових взаємодій між матеріалом і парою.

Розрахунок виконується за допомогою алгоритму SIMPLE, який забезпечує зв'язок між тиском і швидкістю потоку. Він використовується для розв'язку рівнянь Нав'є-Стокса в стаціонарних і квазістаціонарних потоках, що є важливим для точного прогнозування температурних та масообмінних процесів у барабані. За результатами проведеного моделювання отримано розподіл швидкостей суміші (рис. 3.10), розподіл амплітуди руху частинок (рис. 3.11), а також отримано контур температурного поля сушильного барабану (рис. 3.12).

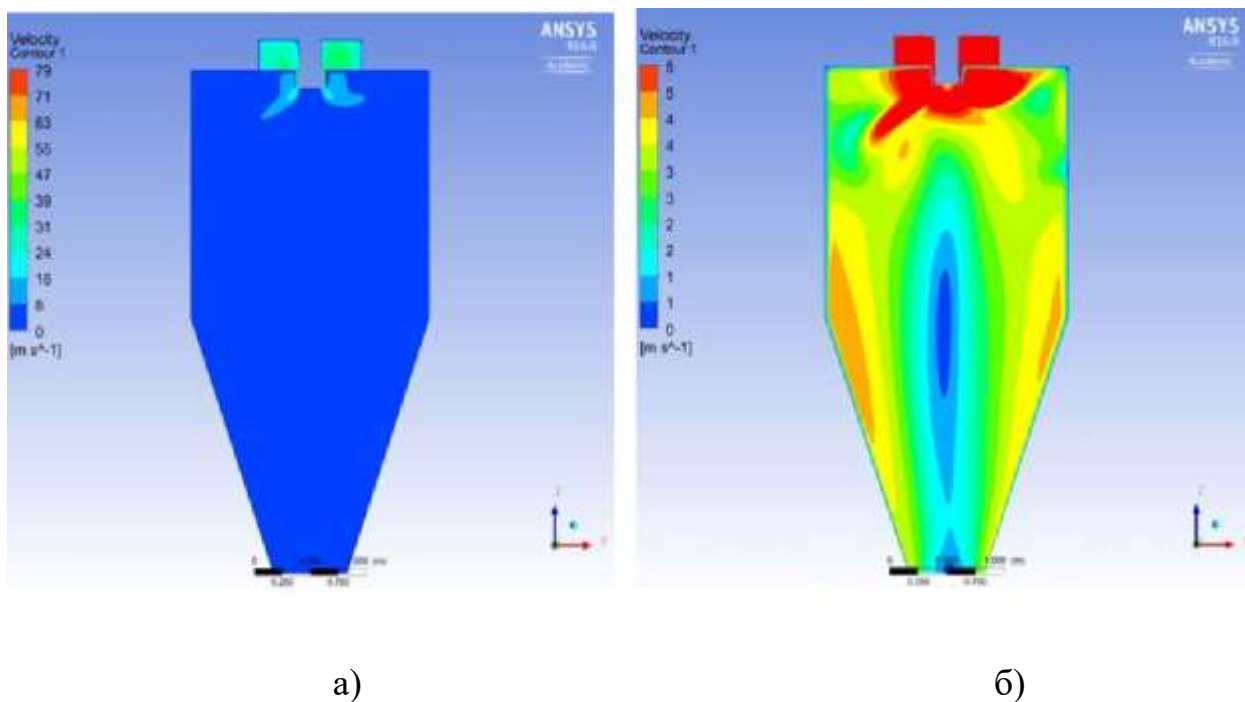


Рисунок 3.10 – Розподіл контуру швидкостей руху цементної суміші у сушильному барабані у глобальному діапазоні (а) та вузькому діапазоні (б) умов розпилення

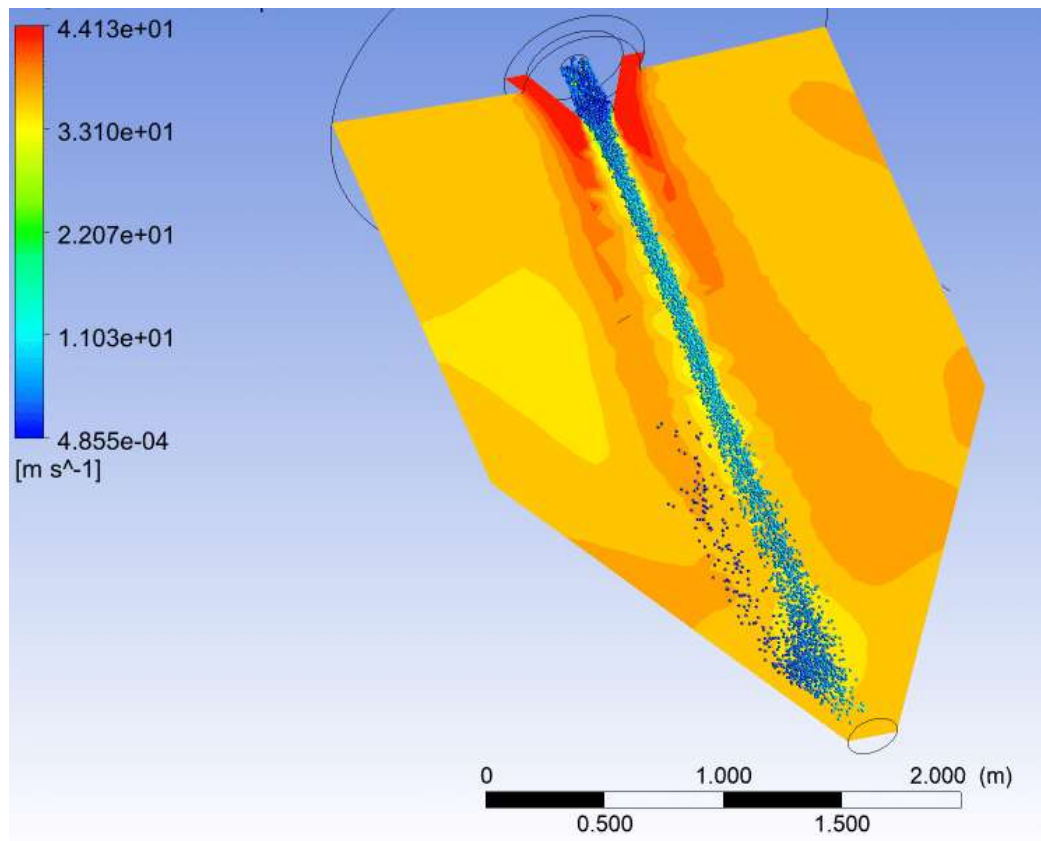


Рисунок 3.11 – Розподіл амплітуди швидкості руху частинок матеріалу

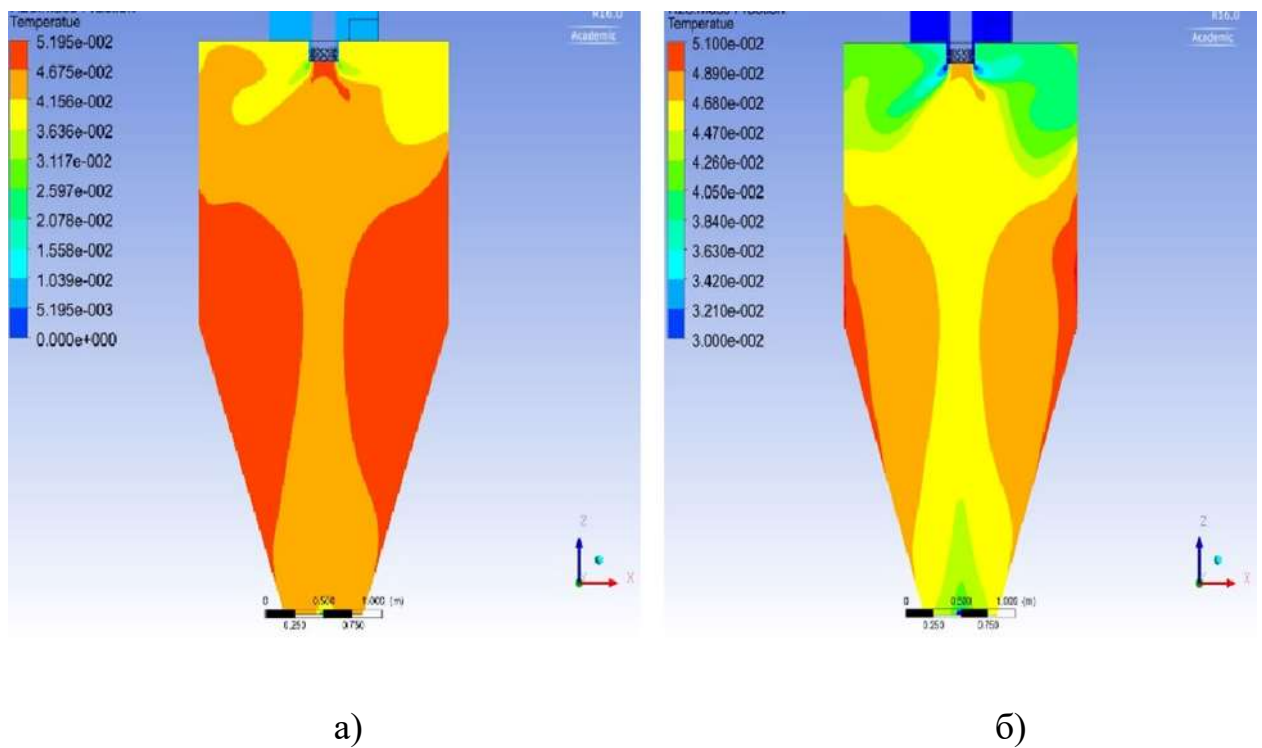


Рисунок 3.12 – Температурне поле сушильного барабану у глобальному діапазоні (а) та вузькому діапазоні (б) повітряного контуру

Аналіз отриманих результатів дозволяє оцінити розподіл температури в барабані, швидкість випаровування води, рівномірність прогріву матеріалу. Виявлено, що для забезпечення ефективного сушіння необхідно підтримувати градієнт температури в межах 150-200°C між зоною нагріву та вихідною зоною.

Виконане моделювання дозволяє оптимізувати параметри сушіння, підвищити рівномірність видалення води та зменшити витрати енергії, що є важливим фактором для стабільності виробництва цементних сумішей.

3.4 Модель системи електричного приводу в Ansys Twin Builder

3.4.1 Асинхронний двигун із короткозамкненим ротором.

Асинхронні двигуни широко використовуються в системах автоматизації газових пальників, особливо для приводу вентиляторів, завдяки їх простоті, надійності та низькій вартості. Типові параметри такого двигуна наведені у табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Параметри асинхронного двигуна для газового пальника

Найменування	Од. вим.	Значення
Номінальна потужність	кВт	1,5
Номінальна напруга	В	380
Частота	Гц	50
Номінальний струм	А	3,2
Кількість полюсів	—	4
Номінальна частота обертання	об/хв	1450
Коефіцієнт корисної дії (ККД)	%	85...90
Коефіцієнт потужності ($\cos \varphi$)	—	0,85
Момент інерції ротора	кг·м ²	0,02
Клас ізоляції	—	F (155 °C)

Асинхронні двигуни підходять для стабільної роботи з великим навантаженням, як-от вентилятори, що працюють тривалий час із можливістю регулювання швидкості.

Розрахунок асинхронного двигуна виконується в Ansys з метою подальшого використання його, як об'єкта із зосередженими параметрами (ROM модель), у програмі Ansys Twin Builder, яка дозволяє виконувати імітаційне моделювання систем керування [104]. Проте, в Ansys є обмеження, яке пов'язане з тим, що перед розрахунком двигуна потрібно заздалегідь знати його основні параметри – це електромагнітні навантаження, геометричні розміри, обмоткові дані, використані матеріали. У довідниках така інформація не надається, тому автором була розроблена на мові Python комп'ютерна програма, яка дозволяє виконувати проєктні розрахунки асинхронного двигуна за його мінімальними паспортними даними, наприклад такими, які наведено у табл. 3.1. Розрахункова частина коду програми наведена у Додатку Г, Лістинг Г.5. Комп'ютерна програма заснована на відомих методик проєктування асинхронних двигунів [105, 106], але модифікована автором за умови реалізації розрахунку у відповідності до паспортних даних електродвигуна, який вже існує. Графічний інтерфейс користувача було розроблено з використанням QtDesigner [107, 108]. На рис. 3.13 – 3.16 наведено для прикладу деякі копії робочих вікон програми. Всього у програмі передбачено такі розділи: завдання початкових даних, введення даних номінального режиму роботи (рис. 3.13), розрахунок геометрії статора, розрахунок осердя статора, розрахунок обмотки статора (рис. 3.14), розрахунок паза статора (рис. 3.15), розрахунок осердя ротора (рис. 3.16), розрахунок паза ротора. Отриманих в результаті розрахунку даних достатньо для наступного моделювання в Ansys [109-111].

На рис. 3.5 зображено приклад сторінки Ansys RMxpert з введення параметрів обмотки асинхронного двигуна. На рис. 3.17 – 3.20 зображено характеристики асинхронного двигуна, отримані в результаті розрахунку.

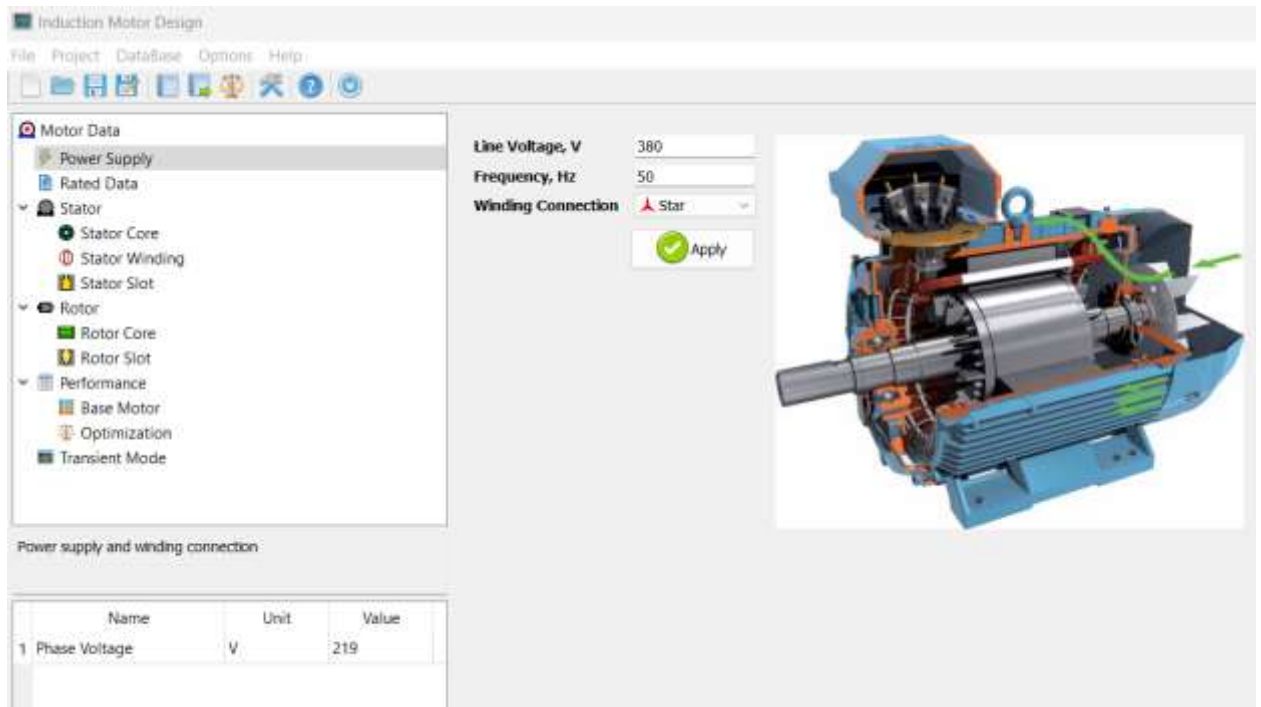


Рисунок 3.13 – Програма проєктування асинхронного двигуна: початкові дані

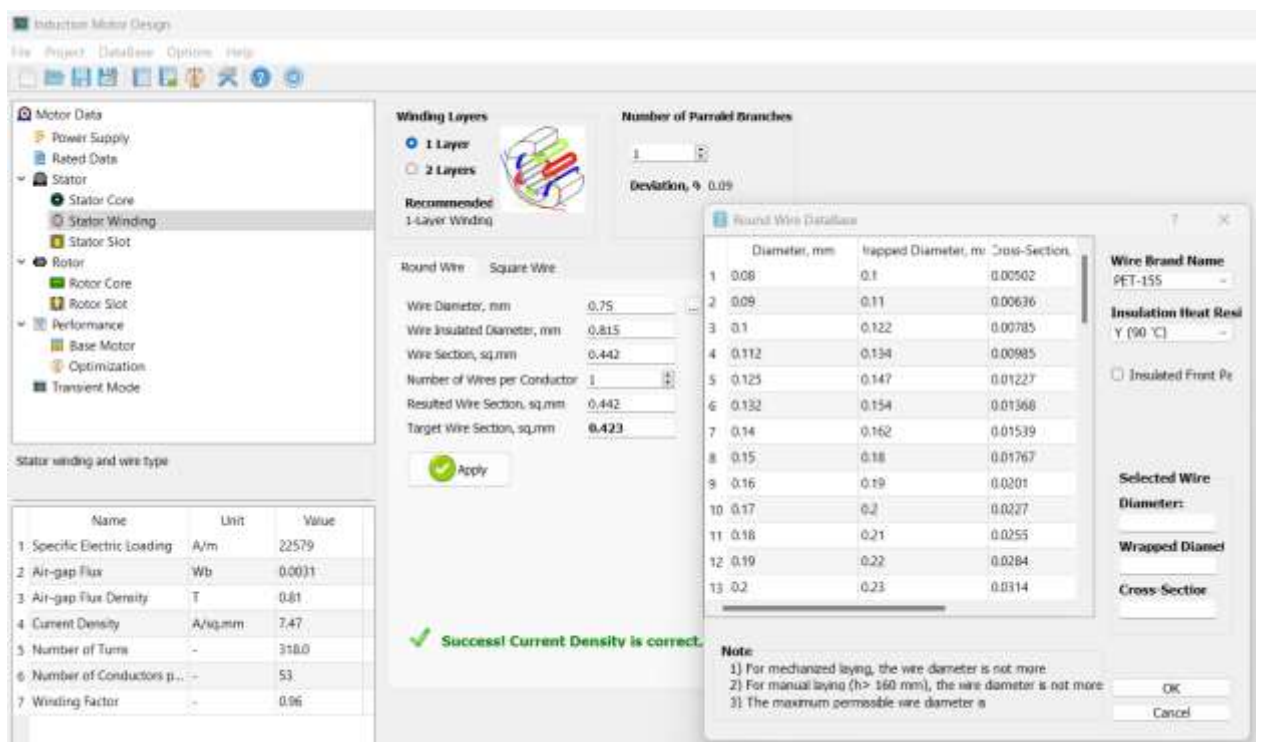


Рисунок 3.14 – Програма проєктування асинхронного двигуна: розрахунок обмотки статора



Рисунок 3.15 – Програма проєктування асинхронного двигуна: розрахунок паза статора

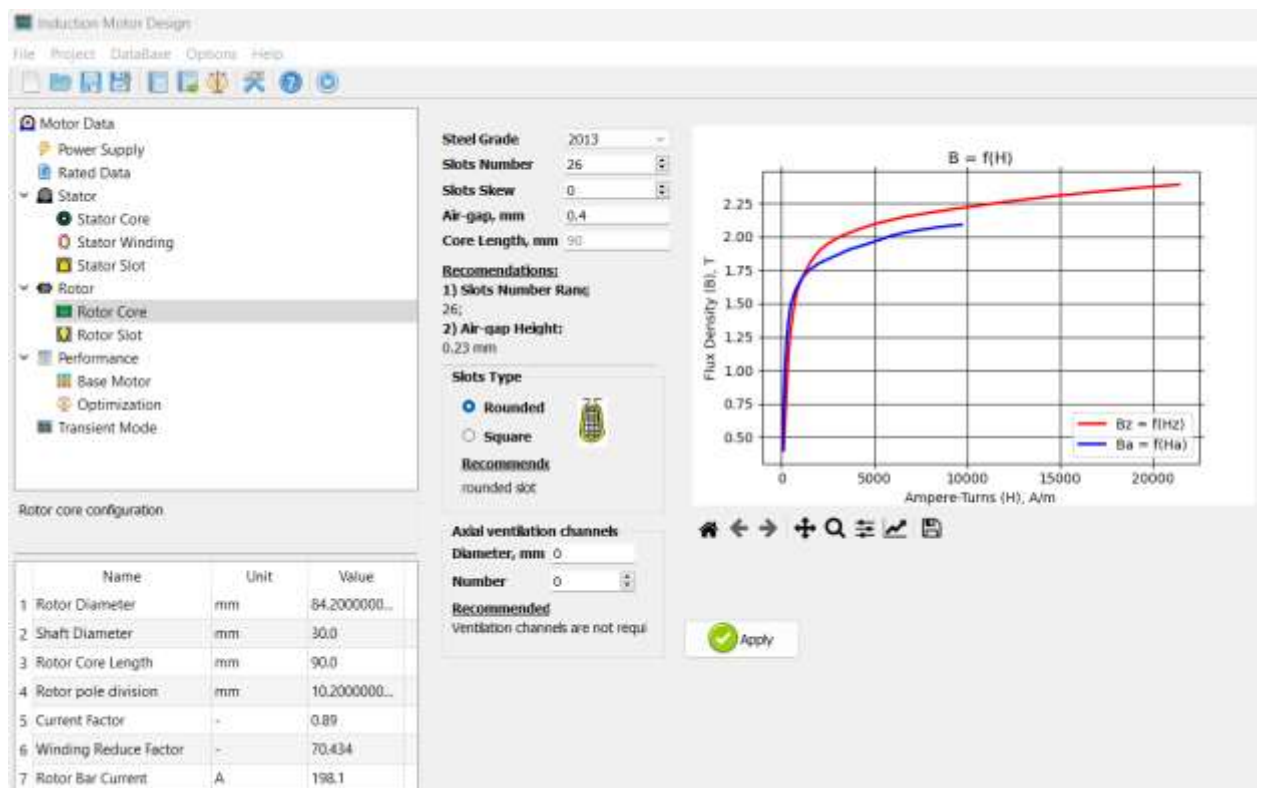


Рисунок 3.16 – Програма проєктування асинхронного двигуна: розрахунок осердя ротора

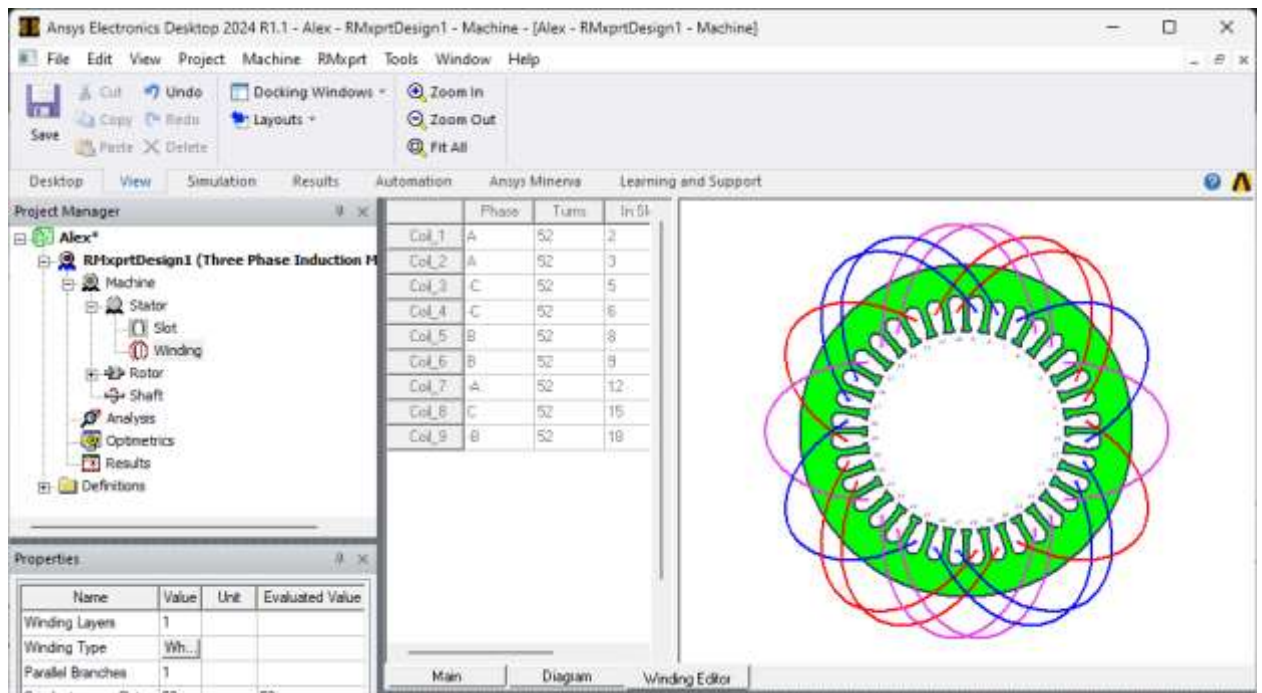


Рисунок 3.17 – Сторінка вибору обмотки асинхронного двигуна в Ansys RMxprt

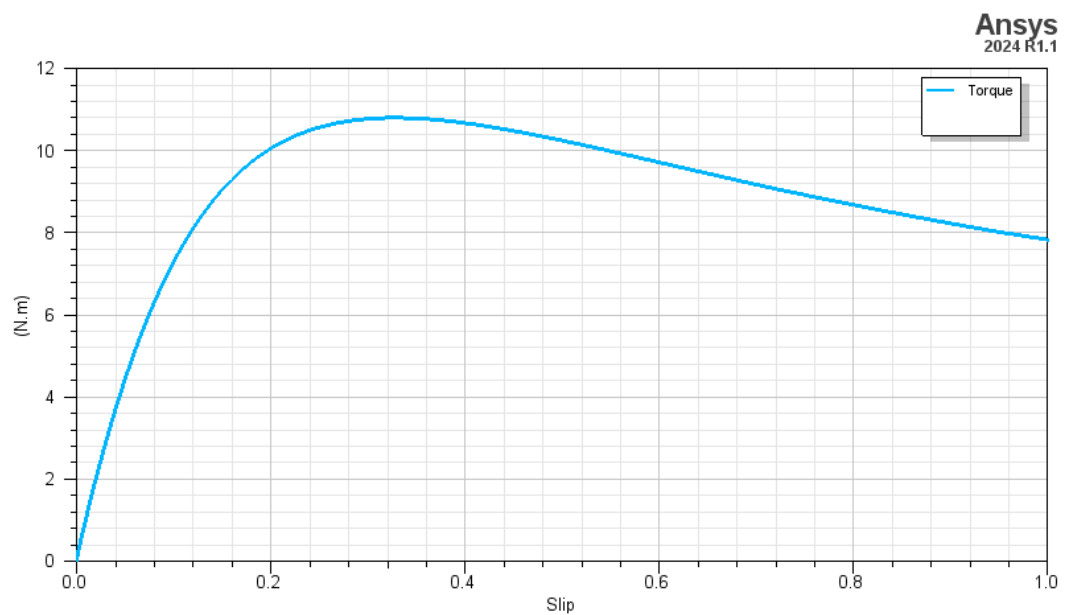


Рисунок 3.18 – Результати розрахунку асинхронного двигуна в Ansys RMxprt: залежність моменту обертання від ковзання

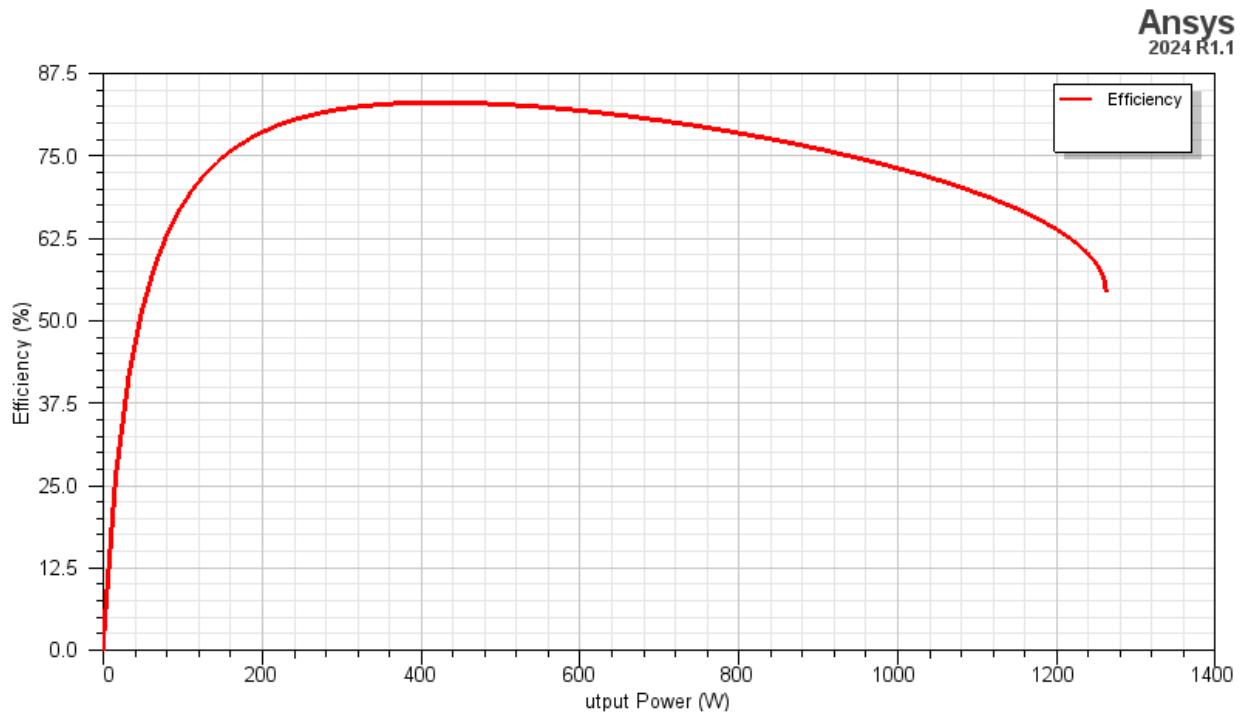


Рисунок 3.19 – Результати розрахунку асинхронного двигуна в Ansys RMxprt: залежність ККД від потужності на валу

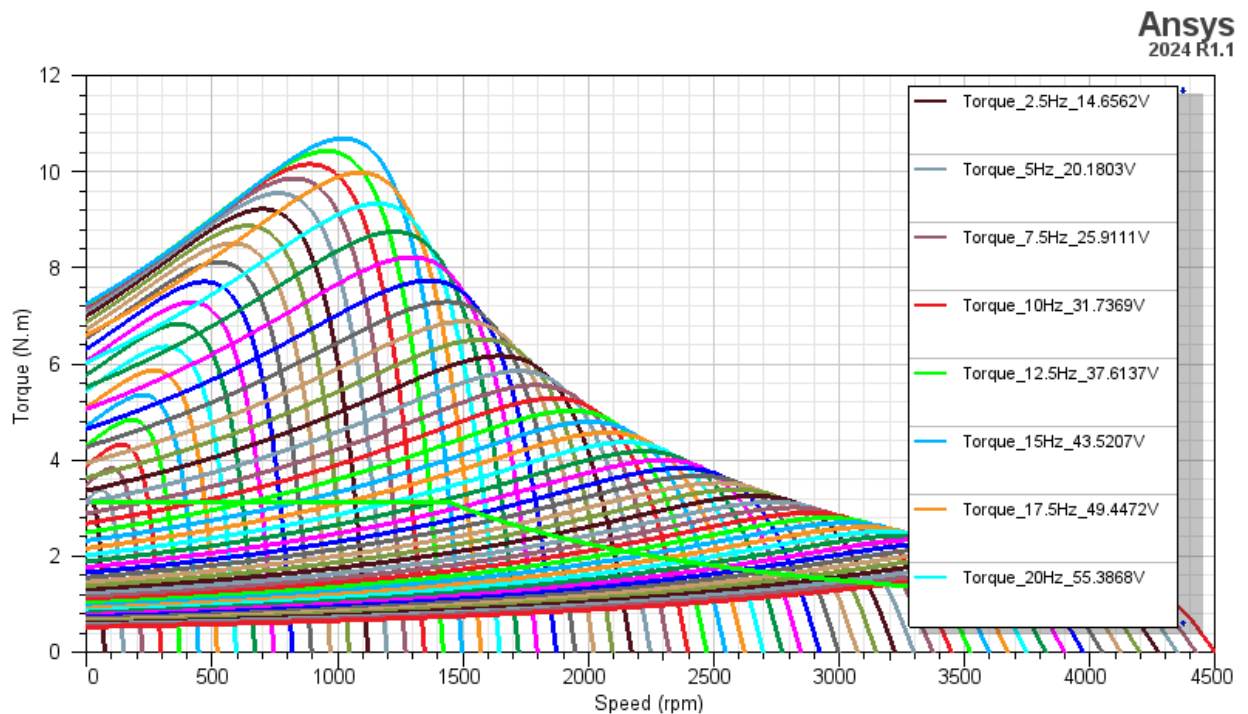


Рисунок 3.20 – Результати розрахунку асинхронного двигуна в Ansys RMxprt: криві моменту в режимі ослаблення поля

При необхідності, можна виконати оптимізацію двигуна за одним чи декількома критеріями оптимальності, якщо параметри в RMxpert задавати не константами, а змінними у певному діапазоні, але у цій роботі така задача не ставилась.

Успішний розрахунок асинхронного двигуна є підставою для формування моделі зниженого порядку (ROM – reduced order model), яка може самостійно використовуватись у полі імітаційного моделювання Ansys TwinBuilder. Зовнішній вигляд моделі асинхронного двигуна після експорту показаний на рис. 3.21.

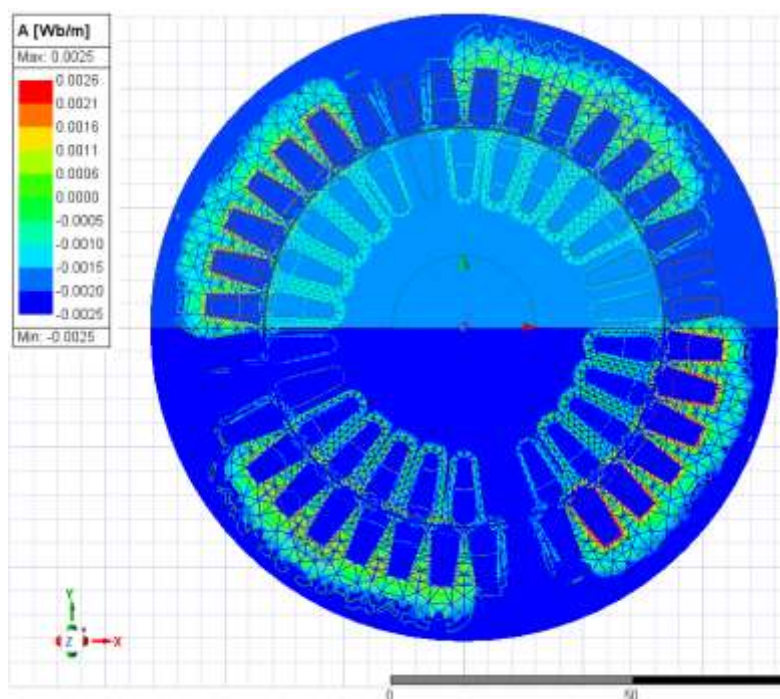


Рисунок 3.21 – Модель асинхронного двигуна в Ansys Maxwell 2D, яка формує ROM об’єкт

Така модель є значно точнішою, ніж моделі, наприклад у Simulink, де поведінка двигуна імітується системою диференціальних рівнянь із зосередженими параметрами. В Ansys використовується польова модель із розподіленими параметрами, що формує якісний цифровий близнюк машини.

При необхідності, можна зробити модель цифрового близнюка ще точнішою, виконавши експорт у тривимірний простір (рис. 3.22), але

розрахунки при цьому будуть значно складнішими і довгими, а результат моделювання, в рамках поставлених завдань імітаційного моделювання, відрізнятись буде несуттєво.

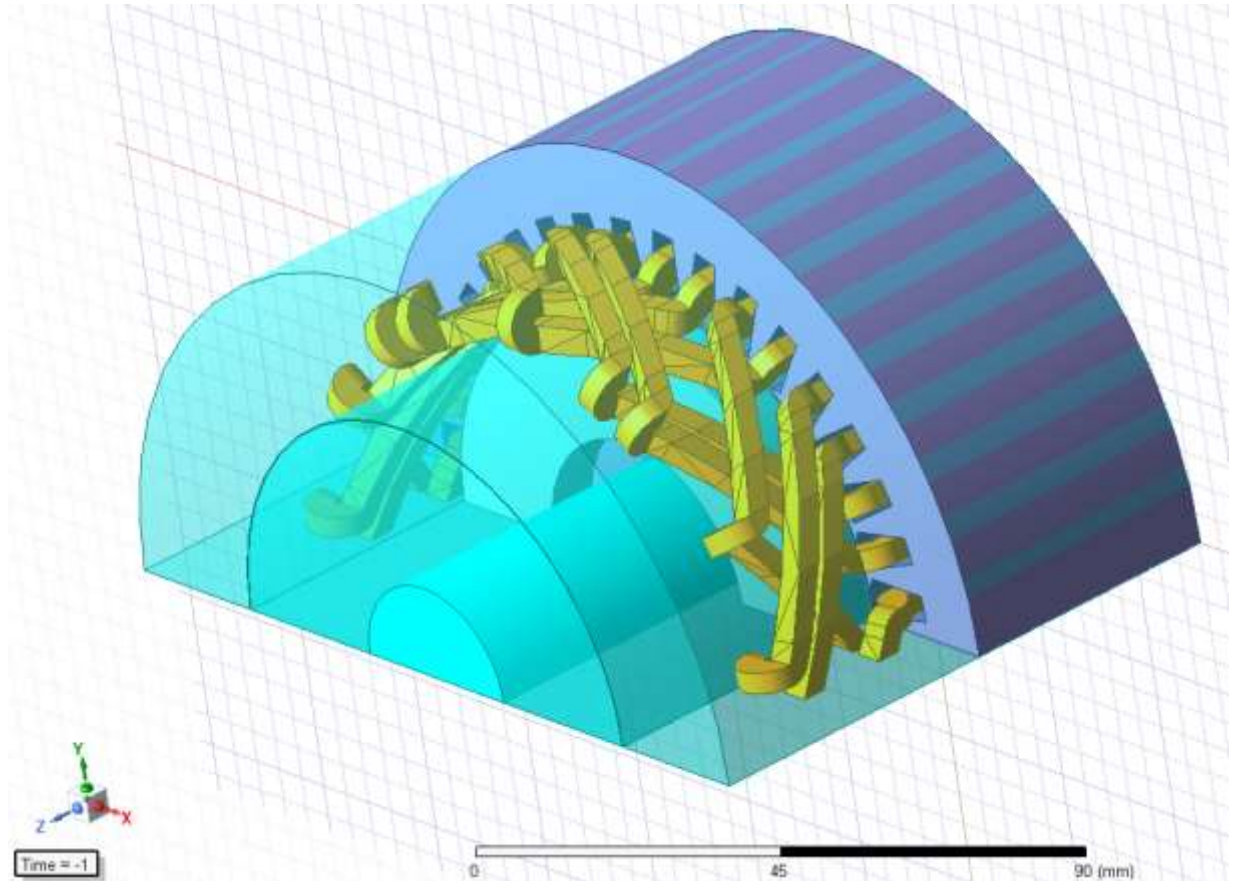


Рисунок 3.22 – Модель асинхронного двигуна в Ansys Maxwell 3D

У подальшому для виконання поставлених завдань роботи буде розглядатись 2D модель електричних двигунів, які все одне будуть точнішими за моделі, засновані на рівняннях із зосередженими параметрами.

3.4.2 Двигун постійного струму. Двигуни постійного струму використовуються для точного керування рухом, наприклад, для приводу шибера повітрозабірника, завдяки їх високій керованості в умовах змінного навантаження [112]. Типові параметри такого двигуна наведені у табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Параметри двигуна постійного струму газового пальника

Найменування	Од. вим.	Значення
Номінальна потужність	кВт	0,5
Номінальна напруга	В	24
Номінальний струм	А	22
Максимальний крутний момент	Нм	3,5
Номінальна частота обертання	об/хв	1500
Коефіцієнт корисної дії (ККД)	%	80...85
Тип обмоток	—	послідовне збудження або збудження від постійних магнітів
Момент інерції ротора	кг·м ²	0,01
Клас ізоляції	—	В (130 °С)

Такі двигуни зазвичай використовуються з драйверами або контролерами, що забезпечують керування напругою або струмом для регулювання положення шибера з високою точністю. Для двигуна постійного струму із постійними магнітами з параметрами, наведеними у табл. 3.2 був знайдений експериментальний зразок, тому необхідність у попередньому розрахунку не виникла. Таким чином, було виконано розрахунки двигуна безпосередньо в Ansys RMxprt із вже відомими розмірами та обмотувальними даними. Приклад сторінки розрахунку двигуна постійного струму з постійними магнітами в Ansys RMxprt наведено на рис. 3.23.

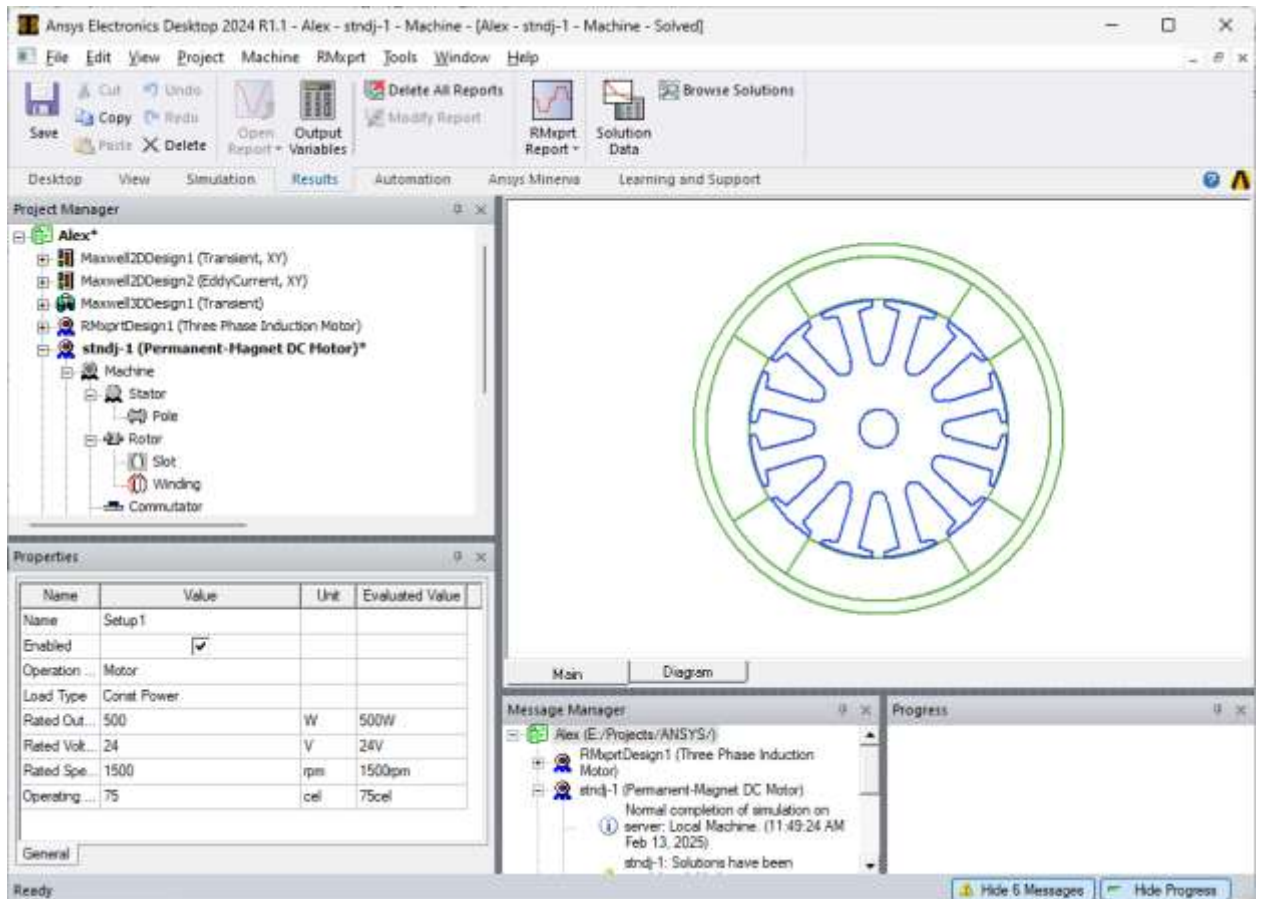


Рисунок 3.23 – Ескіз двигуна постійного струму в Ansys RMxprt

Результати розрахунку двигуна постійного струму із постійними магнітами наведено на рис. 3.24 – 3.26.

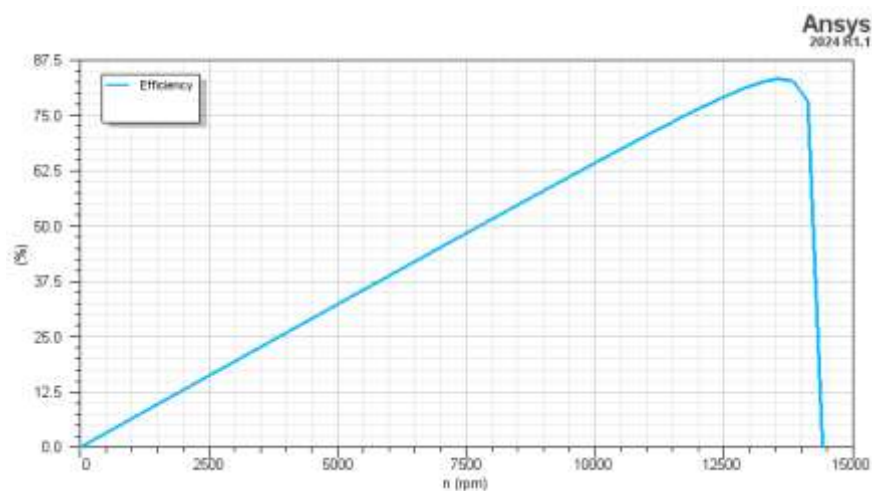


Рисунок 3.24 - Результати розрахунку двигуна постійного струму із постійними магнітами в Ansys RMxprt: залежність ККД від швидкості

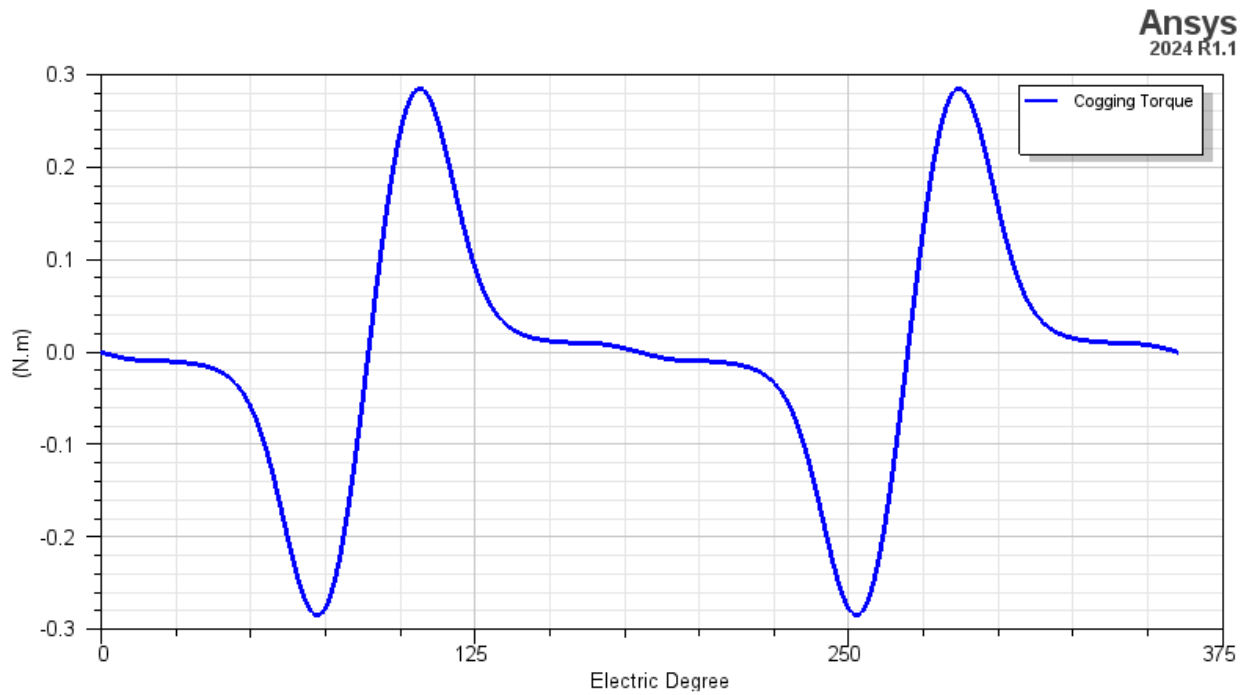


Рисунок 3.25 - Результати розрахунку двигуна постійного струму із постійними магнітами в Ansys RMxprt: залежність зубцевого моменту

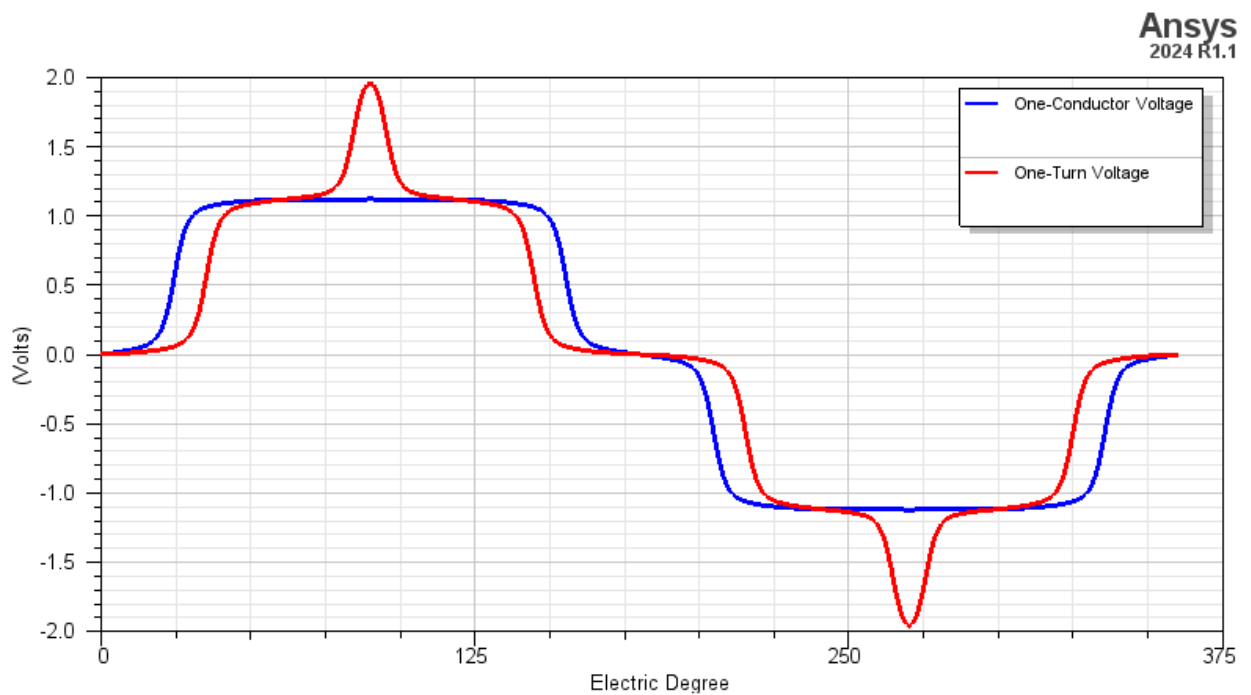


Рисунок 3.26 - Результати розрахунку двигуна постійного струму із постійними магнітами в Ansys RMxprt: напруга у провіднику та витку

Аналогічно розглянутому раніше асинхронному двигуну із короткозамкненим ротором, успішний розрахунок двигуна постійного струму із постійними магнітами є підставою для формування моделі зниженого порядку (ROM – reduced order model), яка може самостійно використовуватись у полі імітаційного моделювання Ansys TwinBuilder [113 - 117]. Зовнішній вигляд моделі двигуна постійного струму із постійними магнітами після експорту показаний на рис. 3.27. Система живлення двигуна наведена на рис. 3.28.

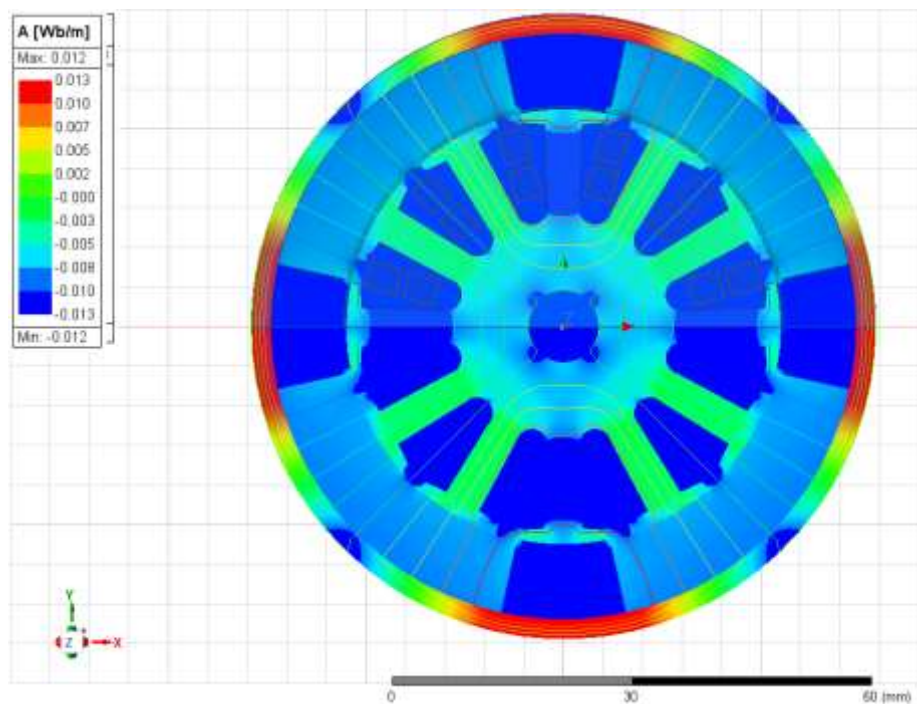


Рисунок 3.27 – Модель двигуна постійного струму із постійними магнітами в Ansys Maxwell 2D, яка формує ROM об'єкт

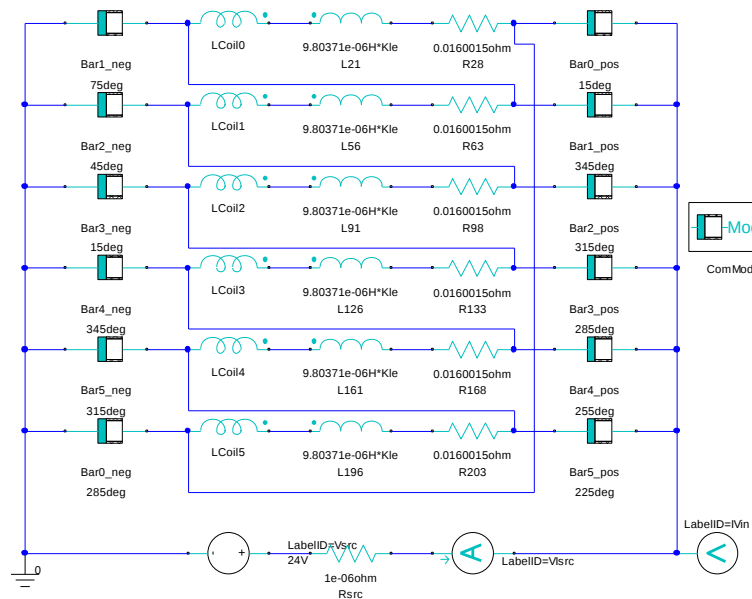


Рисунок 3.28 – Модель живлення двигуна постійного струму в Ansys Circuit Editor

Така модель також є значно точнішою, ніж моделі, наприклад у Simulink, де поведінка двигуна імітується системою диференціальних рівнянь із зосередженими параметрами.

Аналогічна модель двигуна постійного струму із постійними магнітами у тривимірному вигляді в Ansys Maxwell 3D показана на рис. 3.29, але розрахунки при цьому будуть значно складнішими і довшими, а результат моделювання, в рамках поставлених завдань імітаційного моделювання, відрізнитись буде несуттєво.

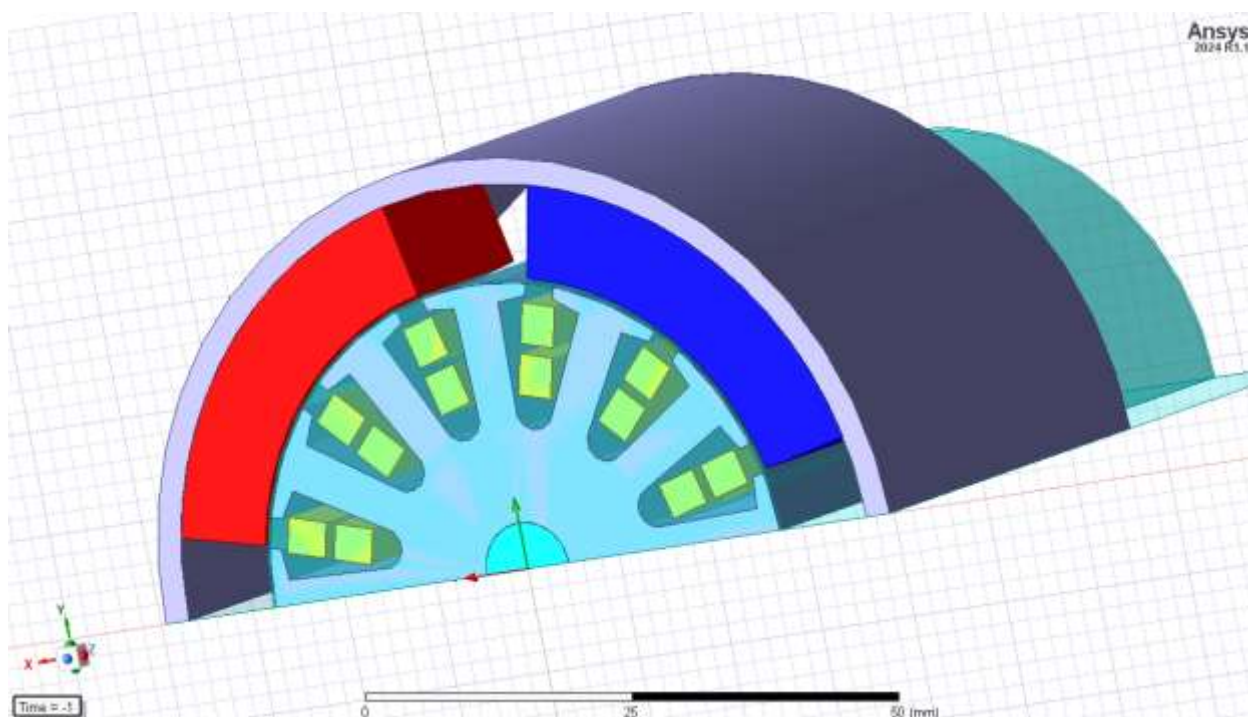


Рисунок 3.29 – Модель двигуна постійного струму із постійними магнітами в Ansys Maxwell 3D

У подальшому для виконання поставлених завдань роботи буде розглядатись 2D модель електричних двигунів.

3.4.3 Скалярне керування асинхронним двигуном. Скалярне керування асинхронним двигуном в Ansys Twin Builder є одним із базових і найбільш широко використовуваних методів керування швидкістю обертання таких двигунів. Цей підхід базується на підтриманні сталого співвідношення напруги до частоти (U/f), що забезпечує стабільний магнітний потік у двигуні незалежно від швидкості обертання [118-120]. В Ansys Twin Builder реалізація скалярного керування дозволяє детально змоделювати процес роботи асинхронного двигуна в динаміці, враховуючи взаємодію між керуючими сигналами, електромагнітними процесами та механічним навантаженням [121].

У скалярному керуванні частотний перетворювач генерує змінну напругу та частоту живлення двигуна, адаптуючи ці параметри до заданої

швидкості обертання. Основна ідея методу полягає у збереженні магнітного потоку ротора на постійному рівні, що досягається пропорційною зміною амплітуди напруги разом із частотою. Наприклад, якщо частота зменшується до 50% від номінальної, то й напруга зменшується вдвічі. У Twin Builder ця взаємодія моделюється через формулу $U = k \cdot f$, де k – коефіцієнт, визначений характеристиками двигуна.

Моделювання в Twin Builder включає створення блочної схеми системи скалярного керування [122-124]. Основними компонентами є генератор частотного сигналу, модуль широтно-імпульсної модуляції (ШІМ), який формує необхідну напругу для двигуна, і зворотній зв'язок для контролю швидкості. Twin Builder дозволяє інтегрувати параметри двигуна, такі як номінальна напруга, частота та інерція ротора, що дає змогу отримати точні моделі процесів розгону, гальмування та стабілізації швидкості.

Однією з особливостей скалярного керування є те, що воно забезпечує стабільну роботу двигуна в більшості режимів, проте не враховує миттєві зміни електромагнітного поля в динаміці. В Twin Builder можна досліджувати вплив цих обмежень через зміну параметрів навантаження або частотних характеристик, що дозволяє отримати реалістичні моделі роботи двигуна в умовах змінного навантаження, як, наприклад, при роботі вентилятора газового пальника.

Побудова моделі починається зі створення працездатної схеми запуску двигуна від нерегульованого джерела живлення. Коректне відпрацювання моделі є підставою для її ускладнення і подальшої модернізації. На рис. 3.30 показано структурну схему моделі асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором в Ansys Twin Builder.

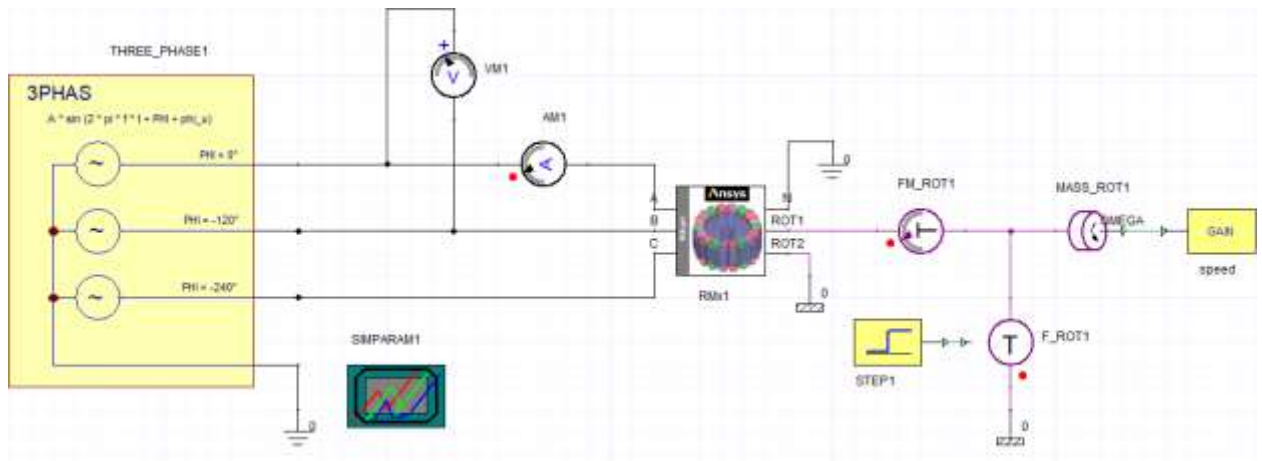


Рисунок 3.30 – Модель прямого пуску асинхронного двигуна в Ansys Twin Builder

Модель на рис. 3.30 містить:

- трифазне нерегульоване джерело живлення THREE_PHASE1;
- модель зниженого порядку (ROM-об'єкт) асинхронного двигуна RMx1, попередньо розрахованого в Ansys Maxwell і імпортованого у поле Ansys Twin Builder;
- блок інерції ротора MASS_ROT1;
- блок механічного навантаження F_ROT1;
- крокова функція STEP1, яка задає значення механічного навантаження (у даній моделі момент змінюється з 0 на 20 Нм при часі моделювання 0,5 с);
- вимірювач швидкості і моменту FM_ROT1;
- вольтметр VM1 і амперметр AM1;
- блок перетворення значення швидкості з рад/с на об/хв (для побудови графіка);
- блок налаштування параметрів симуляції SIMPARAM1.

Результати моделювання розбігу асинхронного двигуна наведено на рис. 3.31 – 3.32.

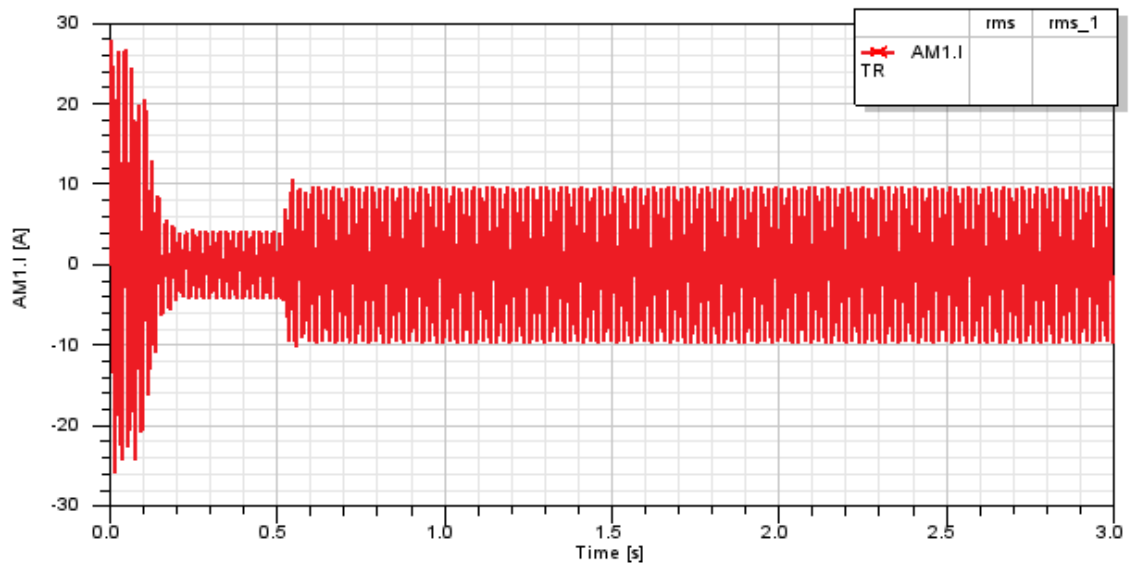


Рисунок 3.31 – Результати моделювання асинхронного двигуна в Ansys Twin Builder: залежність струму фази статора від часу

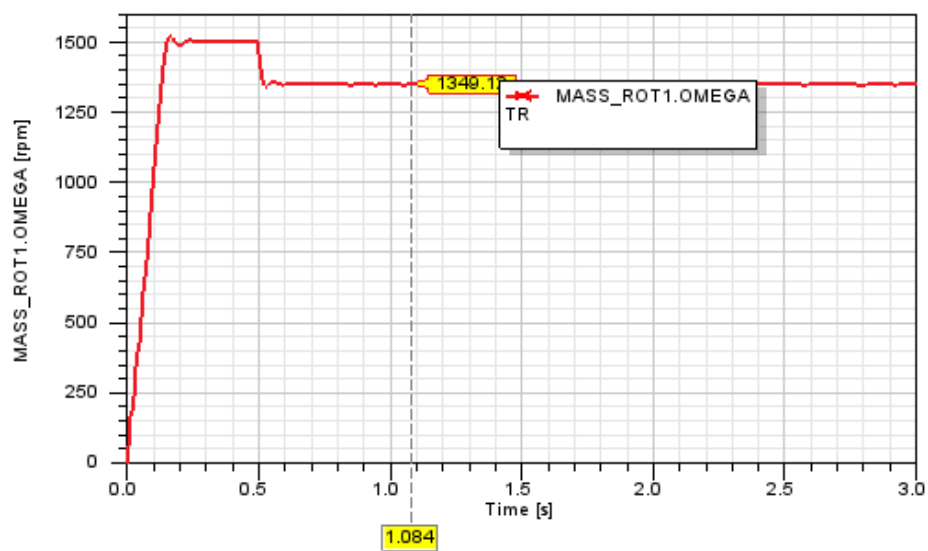


Рисунок 3.32 – Результати моделювання асинхронного двигуна в Ansys Twin Builder: залежність швидкості обертання ротору від часу

Як видно з рис. 3.31 – 3.32, характеристики двигуна адекватно відображають процес прямого пуску з урахуванням накидання навантаження при часі моделювання 0,5 с. Наступний крок полягає з розробки імітаційної моделі скалярного керування.

Розроблена модель скалярного керування асинхронним двигуном з короткозамкненим ротором наведена на рис. 3.33 – 3.35.

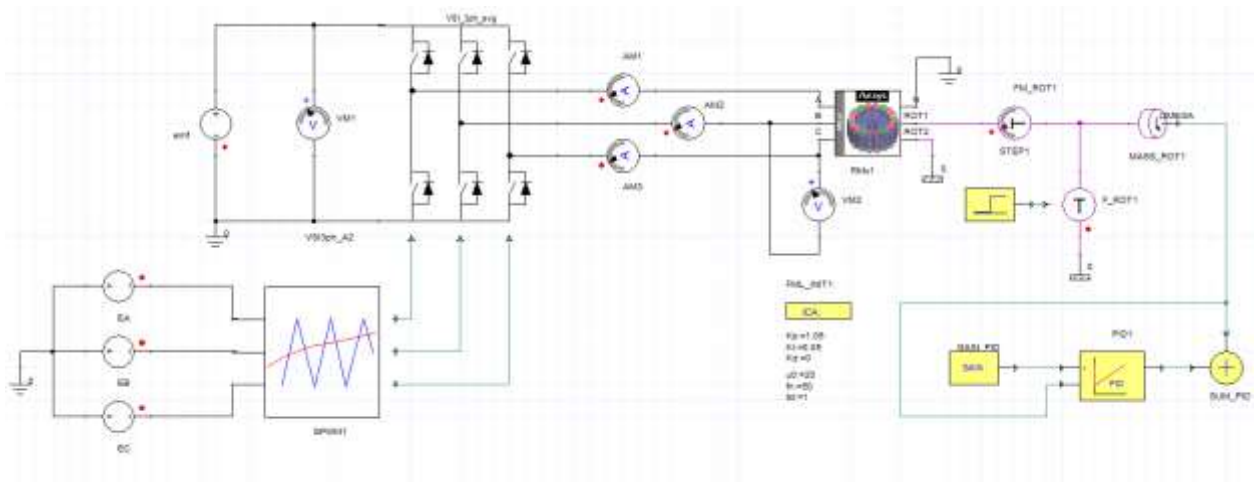


Рисунок 3.33 – Модель скалярного керування асинхронним двигуном в Ansys Twin Builder: основна частина

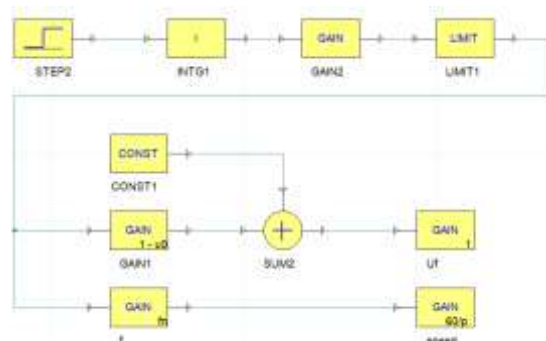


Рисунок 3.34 – Модель скалярного керування асинхронним двигуном в Ansys Twin Builder: реалізація закону скалярного керування

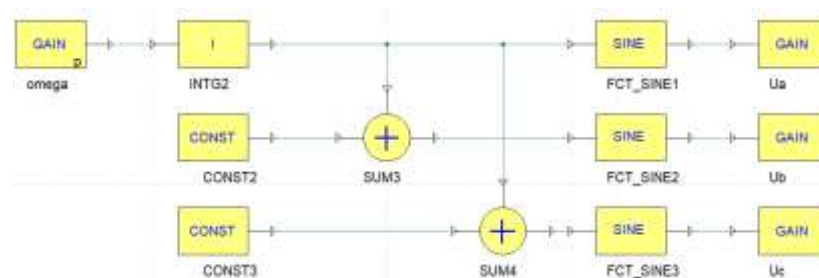


Рисунок 3.35 – Модель скалярного керування асинхронним двигуном в Ansys Twin Builder: формування напруги фаз для ШІМ

В розробленій моделі (рис. 3.33) замість нерегульованого джерела живлення (див. рис. 3.30) до фаз двигуна приєднаний трифазний інвертор VSI3ph_A2. Регулювання перемиканням транзисторів інвертора виконується за допомогою блока синусоїдального ШІМ SPWM1.

У цій моделі вал двигуна ROT1 приєднаний до негативного входу ПД-регулятора PID1. На позитивний вхід ПД-регулятора подається модульована частота з блоку GAIN_PID з урахуванням кількості пар полюсів двигуна ($2 \cdot \pi / p$). Формування частоти виконується за схемою, показаною на рис. 3.34, яка реалізує систему нерівностей (2.41). Вихід ПД-регулятора SUM_PID подається на вхід блоку omega формування вхідної напруги ШІМ (рис. 3.35). Схема формування синусоїдального сигналу враховує інтегрування швидкості для запобігання її дублювання при зміні частоти, що показано у виразі (2.40).

Результати моделювання скалярного керування асинхронним двигуном показані на рис. 3.36 – 3.38.

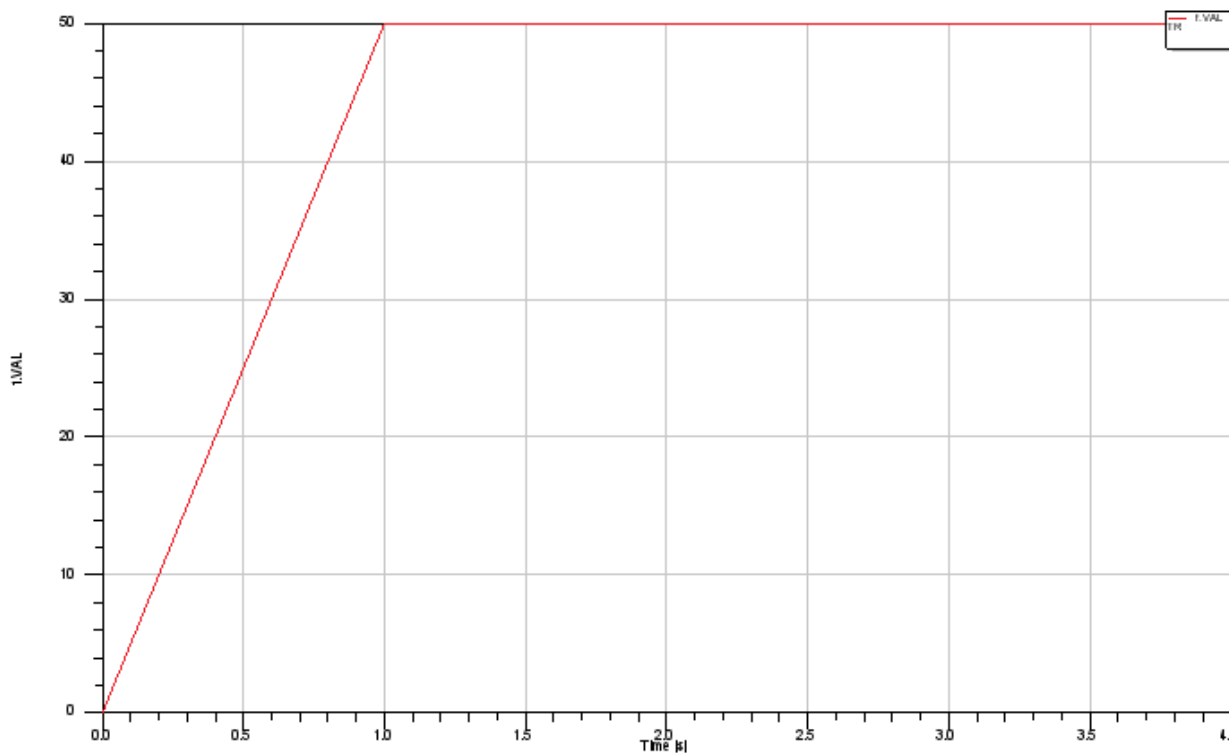


Рисунок 3.36 – Скалярне керування асинхронним двигуном в Ansys Twin Builder: сигнал завдання опорної частоти

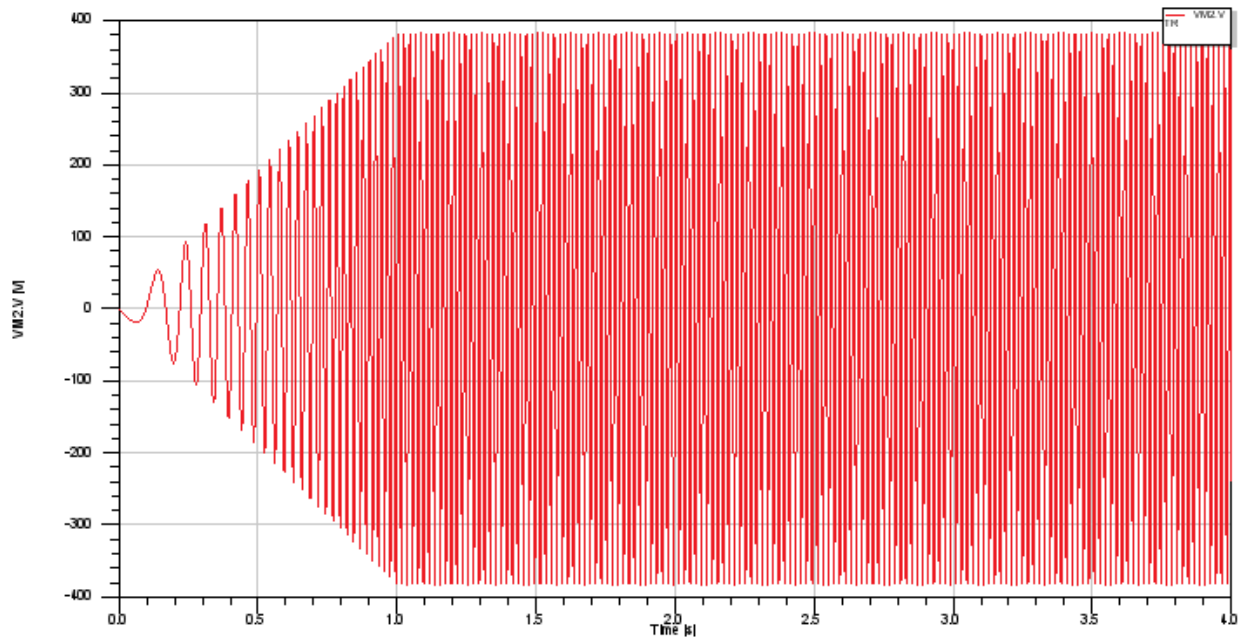


Рисунок 3.37 – Скалярне керування асинхронним двигуном в Ansys Twin Builder: залежність напруги від часу

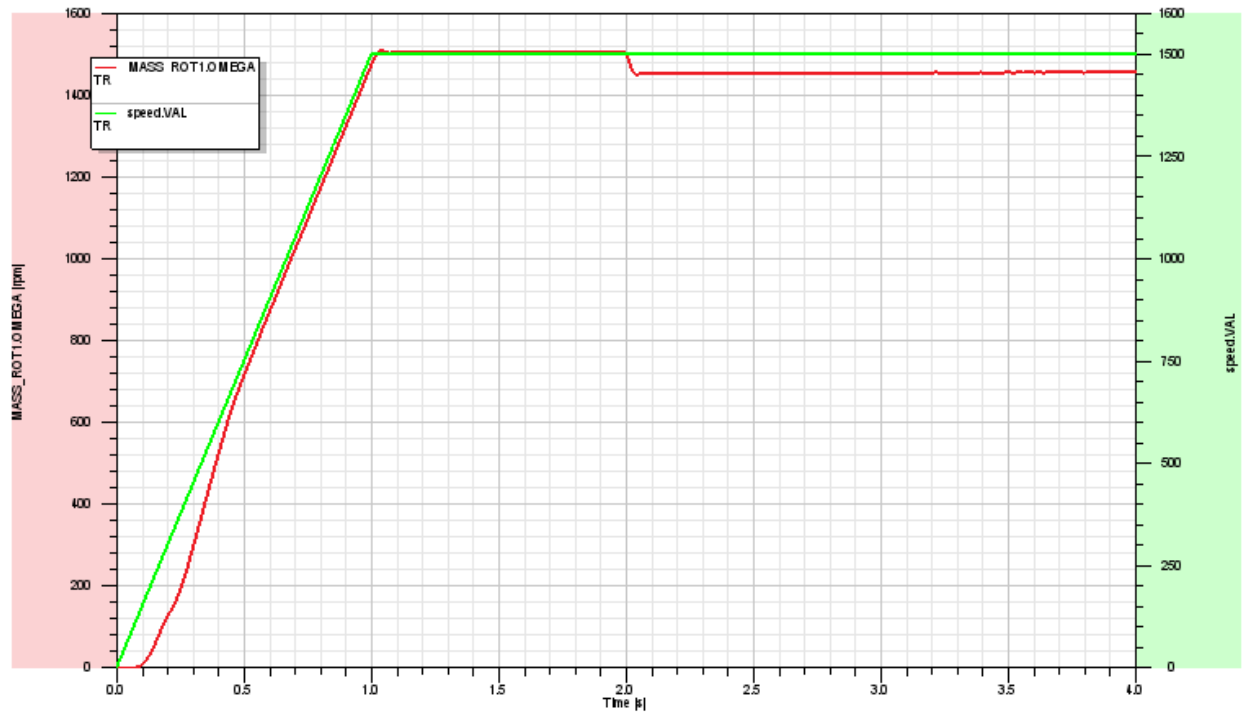


Рисунок 3.38 – Скалярне керування асинхронним двигуном в Ansys Twin Builder: характеристики відпрацьованої та опорної швидкостей

Результати моделювання свідчать про те, що використання скалярного керування в Ansys Twin Builder дозволяє не лише моделювати роботу асинхронного двигуна, але й створювати інтегровані системи керування, які можуть бути оптимізовані для конкретних умов роботи. Модель скалярного керування є простою у реалізації та обчислювально ефективною, що робить її корисною для моделювання енергозалежних систем, таких як автоматизація газових пальників.

3.4.4 Векторне керування асинхронним двигуном. У розробленій моделі скалярного керування є недолік, пов'язаний із неточністю підтримання швидкості на низьких частотах обертання та при різкій зміні навантаження. Окрім того, скалярне керування за своєю суттю не дозволяє одночасно підтримувати значення швидкості і моменту. В залежності від поставленої задачі доводиться обирати один із двох параметрів для підтримки завдання за опорним сигналом. Цих вад не має векторне керування, яке знаходить широке використання попри значне збільшення складності реалізації та вартості комплектуючих [125, 126].

Основна ідея векторного керування полягає в контролі не тільки величини і частоти напруги живлення, але також фази [127]. Іншими словами, контролюється величина і кут просторового вектору. Векторне керування, порівняно зі скалярним, має більш високу продуктивність і усуває майже всі його недоліки [128].

Загальна структурна схема системи векторного керування двигуном змінного струму наведена на рис. 3.39. Основою схеми, показаної на цьому рисунку, є зв'язок магнітного потоку та контуру керування крутним моментом разом із оцінювачем, який можна реалізувати різними способами. Водночас зовнішній контур регулювання швидкості значною мірою уніфікований і генерує керуючі сигнали для регуляторів крутного моменту M^* і потокозчеплення Ψ^* (через блок керування потоком). Швидкість двигуна може бути виміряна датчиком (швидкість/положення) або отримана за допомогою оцінювача, що дозволяє реалізувати безсенсорне керування.

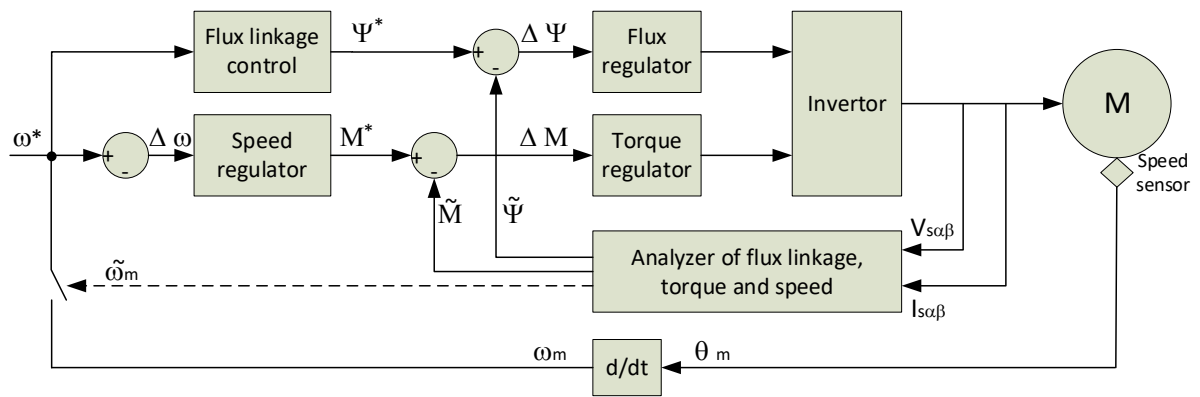


Рисунок 3.39 – Загальна функціональна схема векторного керування

Для автоматизації керування роботою асинхронних електроприводів газового пальника в Ansys Twin Builder розроблено систему векторного керування у відповідність до закону з орієнтацією за полем, або англійською FOC [129]. Управління FOC, орієнтоване на поле, базується на аналогії з колекторним двигуном постійного струму з механічною комутацією і незалежним збудженням [130-132]. У цьому двигуні обмотки збудження та обмотки якоря розділені, зчеплення потоку контролюється струмом поля індуктора, а крутний момент незалежно контролюється шляхом регулювання струму якоря. Таким чином, потокозчеплення та струми крутного моменту електрично та магнітно розділені (рис. 3.40).

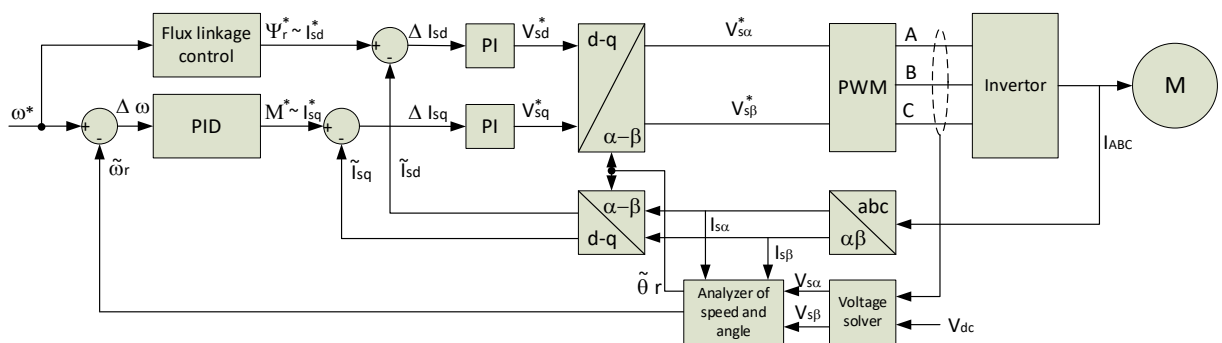


Рисунок 3.40 – Загальна функціональна схема безсенсорного полеорієнтованого керування

В керуванні, орієнтованому на поле, крутний момент і поле контролюються опосередковано шляхом керування компонентами вектору струму статора. Миттєві струми статора перетворюються на обертову рамку dq за допомогою перетворення Парка $\alpha\beta/dq$, яке також вимагає знання положення ротора. Поле контролюється поздовжньою складовою струму I_{sd} , а крутний момент – поперечною складовою струму I_{sq} . Інверсне перетворення Парка ($dq/\alpha\beta$), математичний модуль перетворення координат, обчислює опорні компоненти вектору напруги V_{sa}^* і V_{sb}^* [113].

Для визначення положення ротора використовується або датчик положення ротора, встановлений в електродвигуні, або реалізований в системі керування бездатчиковий алгоритм керування, який розраховує інформацію про положення ротора в режимі реального часу на основі даних, наявних у системі керування [133].

Розроблена імітаційна модель векторного керування за полем асинхронним двигуном в Ansys Twin Builder показана на рис. 3.41.

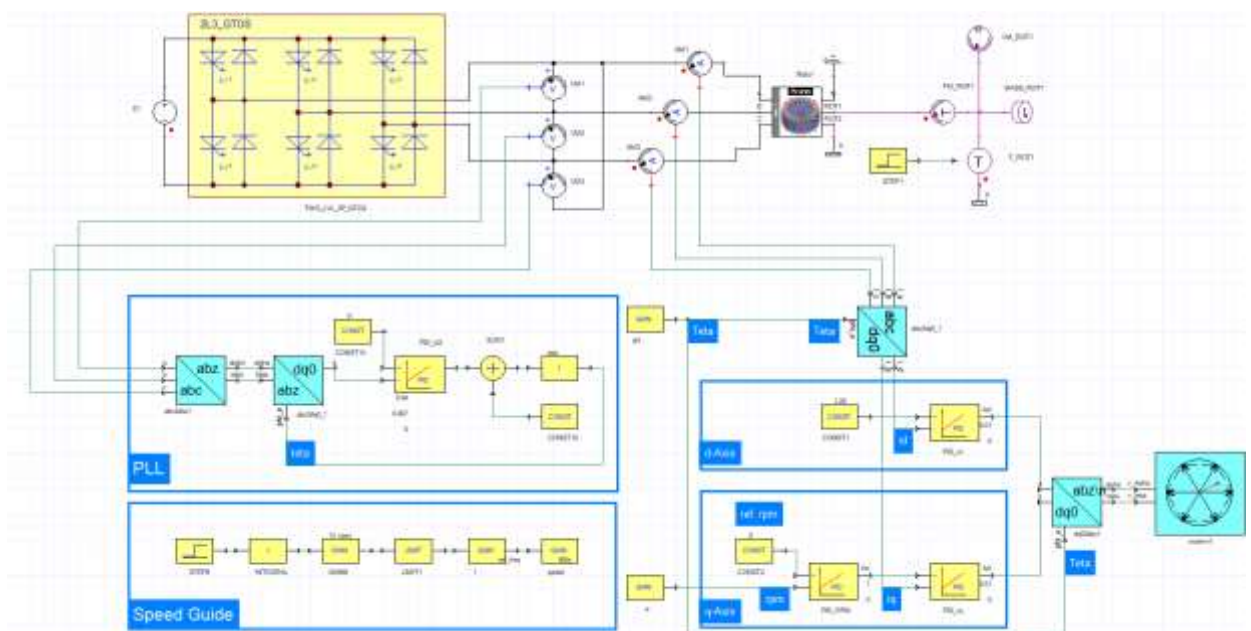


Рисунок 3.41 – Модель векторного керування асинхронним двигуном в Ansys Twin Builder: повна схема

Виділені на рис. 3.38 частини моделі у збільшеному масштабі показано окремо на рис. 3.42 – 3.44.

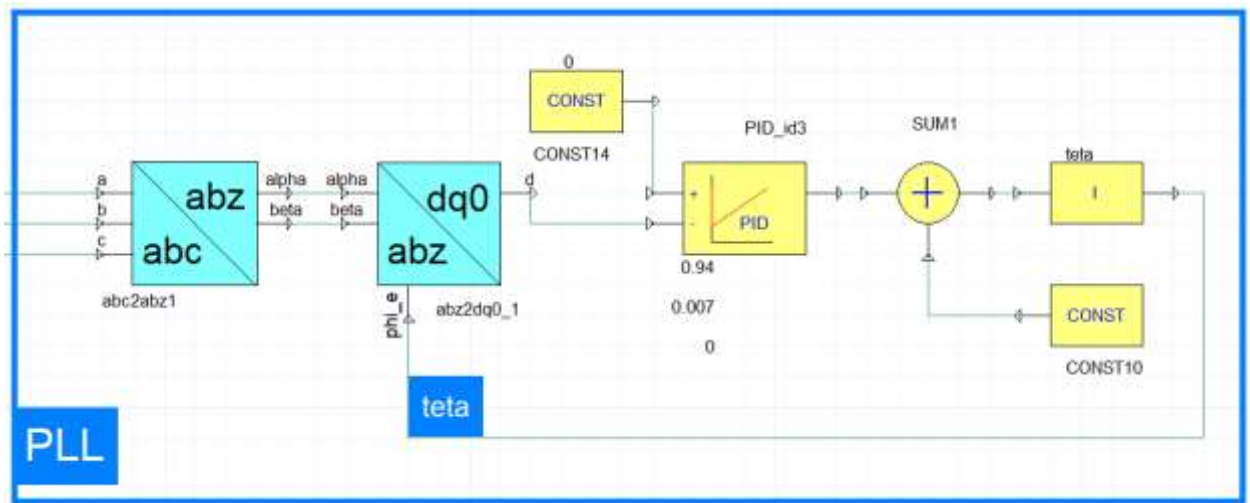


Рисунок 3.42 – Модель векторного керування асинхронним двигуном в Ansys Twin Builder: фазове авто-налаштування частоти PLL

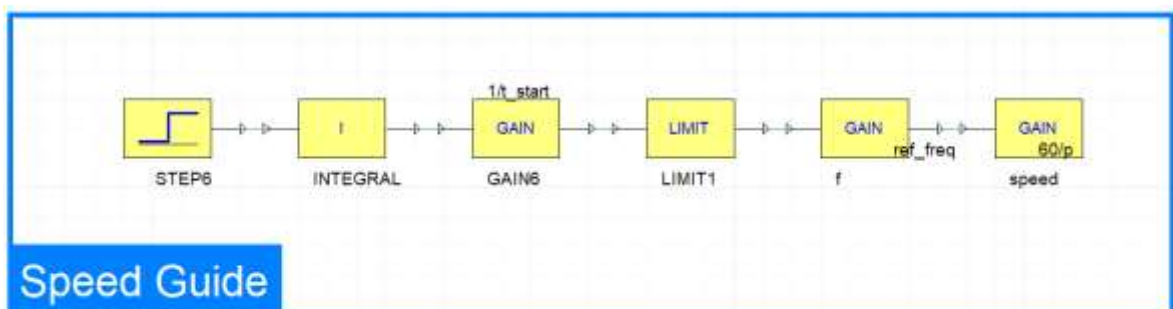


Рисунок 3.43 – Модель векторного керування асинхронним двигуном в Ansys Twin Builder: формування опорної швидкості

Силовa частина, представлена на рис. 3.41, складається з ланки постійного струму у вигляді джерела EPC (400 В), дворівневого трифазного транзисторного інвертора TWO_LVL_3P_GTO2, вимірювальних приладів, імпортованого ROM-об'єкта електродвигуна та механічного блоку навантаження. Блок STEP1 активує навантаження на вал двигуна при часі моделювання 1,2 с.

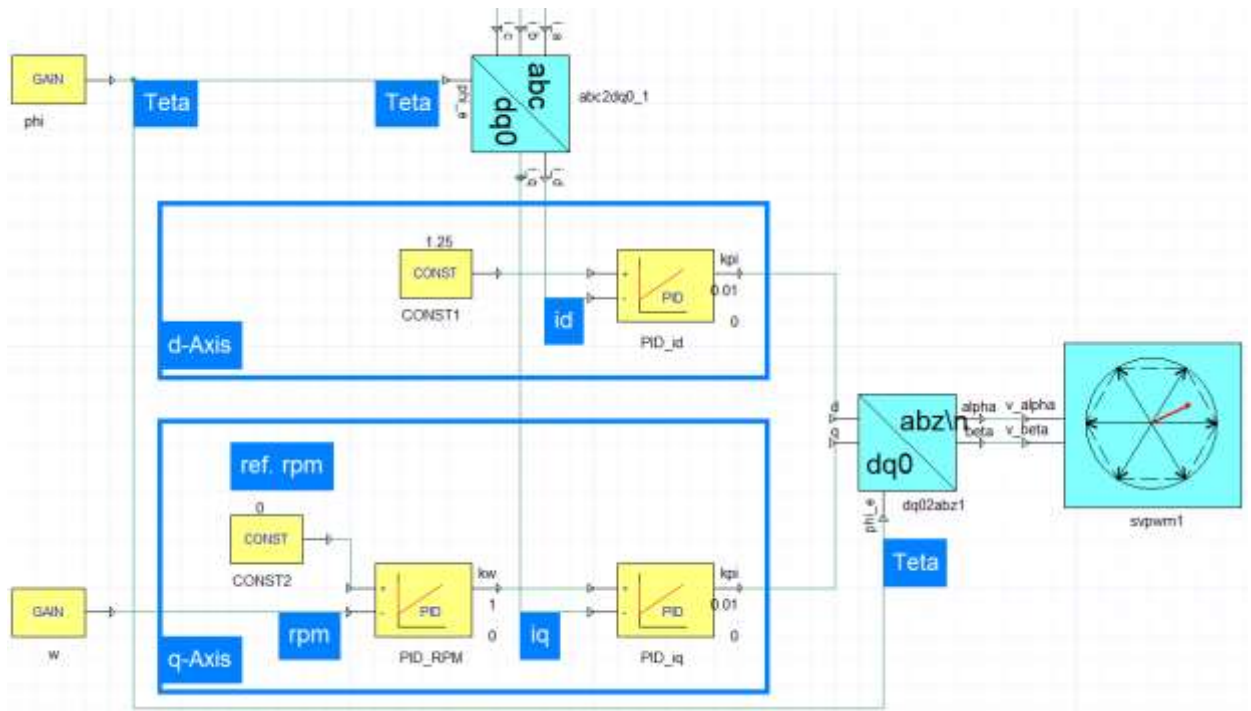


Рисунок 3.44 – Модель векторного керування асинхронним двигуном в Ansys Twin Builder: контролери струму і моменту

Блок PLL фазового авто-налаштування частоти (ФАНЧ) (див. рис. 3.42) призначений для отримання кута повороту θ системи координат [113, 133]. Існує в основному три типи систем ФАНЧ для відстеження фази: ФАНЧ із перетином нуля, стаціонарним опорним сигналом і системами ФАНЧ з перетином нуля з синхронним обертанням, стаціонарним опорним сигналом і синхронним обертовим опорним сигналом (СОС). СОС ФАНЧ серед перерахованих вище, має найкращі характеристики в спотворених і неідеальних умовах мережі, тому це система була використана в цій роботі. Структурна схема з реалізації СОС ФАНЧ наведена на рис. 3.45.

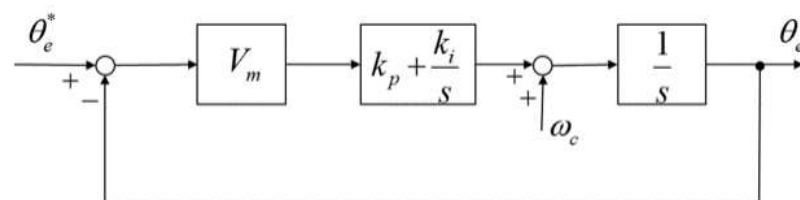


Рисунок 3.45 – Структурна схема передавальної функції ФАНЧ

Під час моделювання поточний час подається в блок Step (див. рис. 3.43) і через інтегратор помножується на $1/t_start$, яке визначає нахил прямої лінії прискорення, де змінна t_start визначає заданий час пуску. Прискорення припиняється, коли поточний час дорівнює t_start , а блок LIMIT1 запобігає подальшому зростанню. Темп прискорення, отриманий таким чином, масштабується на виході (блок speed) в об/хв наступним блоком GAIN. Крім того, цей підхід можна розширити за допомогою блоку для встановлення значення початкової напруги.

Нарешті, блок контролера показаний на рис. 3.44, містить модуль просторового вектору синусоїдального ШІМ (SVPWM1), вихідні сигнали якого задані як параметри перемикальних властивостей транзисторів інвертора. Параметри ПІД-регуляторів струму по осях d/q: $k_p = 6$; $k_i = 0,01$; $k_d = 0$. Параметри ПІД-регулятора швидкості: $k_p = 20$; $k_i = 1$; $k_d = 0$. Блок CONST1 містить значення $1/L_m$ (L_m – індуктивність кола намагнічування двигуна), а блок CONST2 має нульове значення. Блок GAIN з іменем phi отримує як параметр значення $teta.VAL$ від діаграми PLL (рис. 3.39). Блок GAIN з іменем w отримує цільове значення швидкості speed.VAL з вихідного блоку діаграми, показаного на рис. 3.43.

Результати моделювання наведені на рис. 3.46 – 3.49.

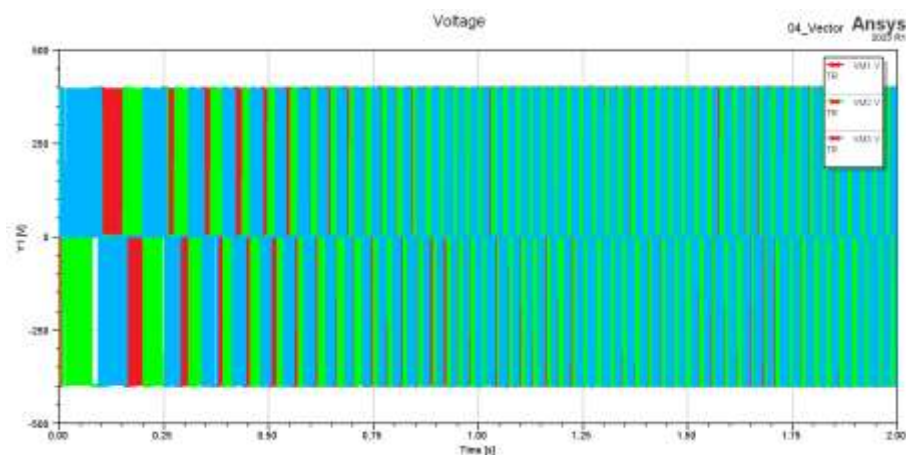


Рисунок 3.46 – Векторне керування асинхронним двигуном в Ansys Twin Builder: зміна напруги у фазах обмотки статора (повний час моделювання)

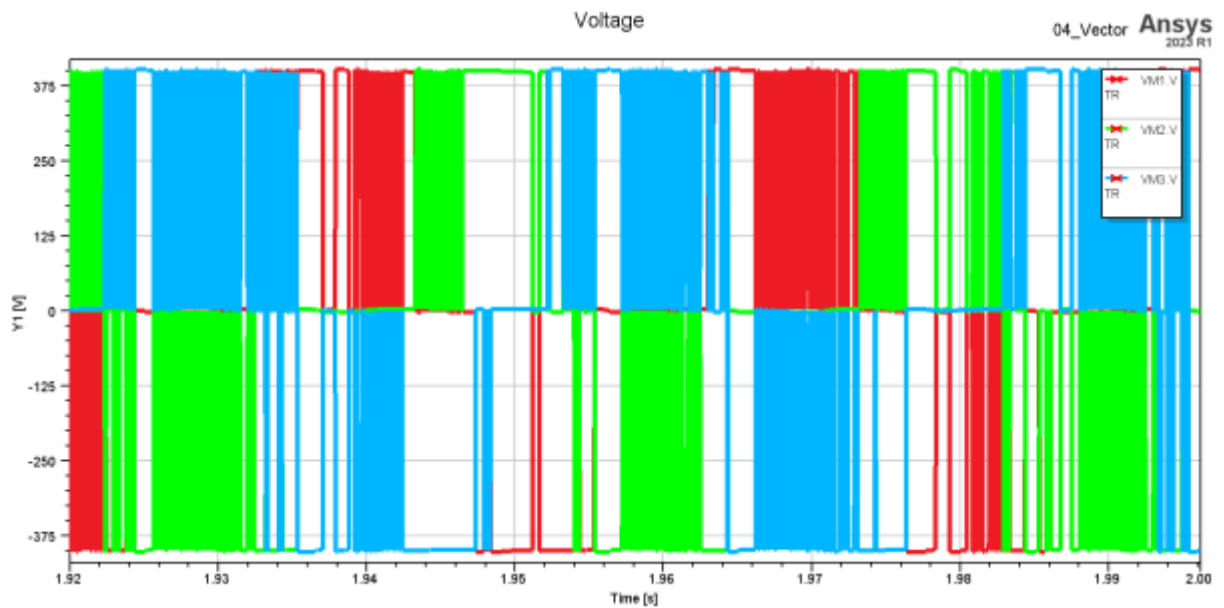


Рисунок 3.47 – Векторне керування асинхронним двигуном в Ansys Twin Builder: зміна напруги у фазах обмотки статора (збільшений відрізок часу наприкінці моделювання)

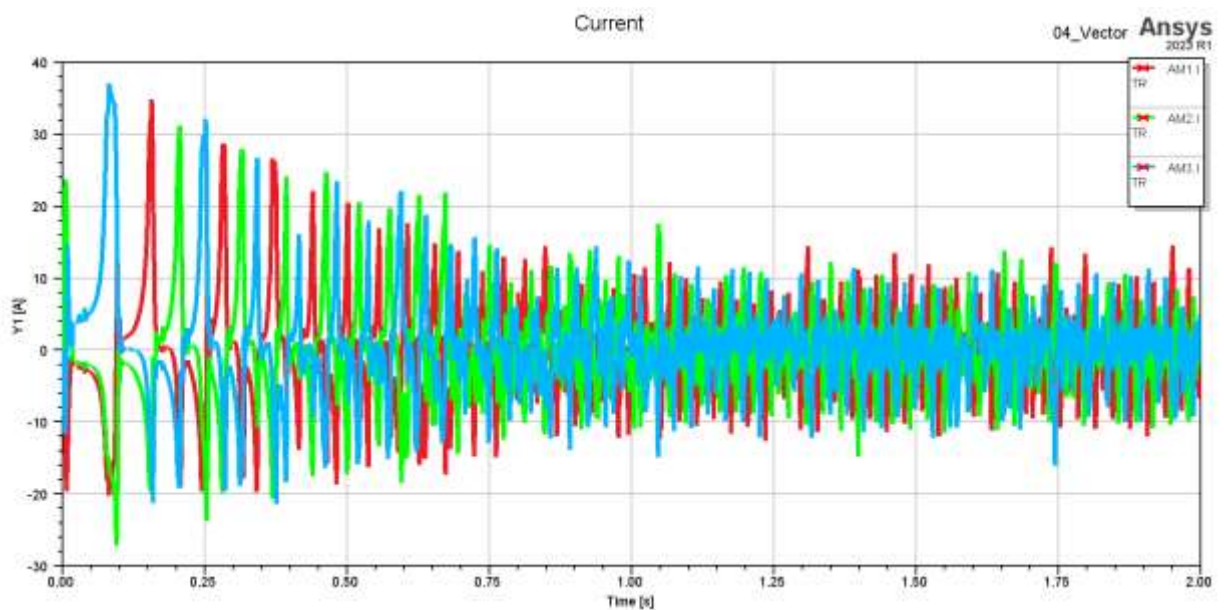


Рисунок 3.48 – Векторне керування асинхронним двигуном в Ansys Twin Builder: зміна струму у фазах обмотки статора

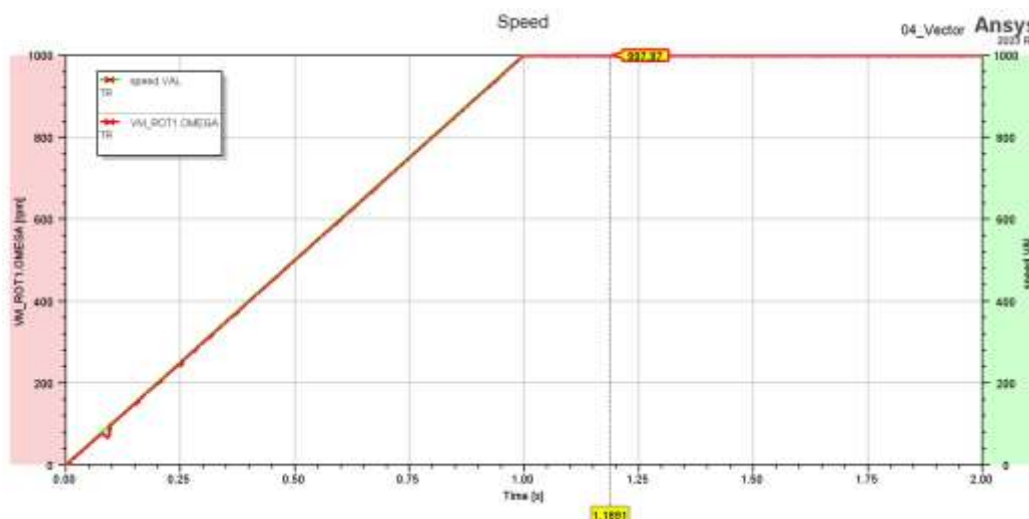


Рисунок 3.49 – Векторне керування асинхронним двигуном в Ansys Twin Builder: характеристика відпрацьованої та опорної швидкостей

Як видно з графіка на рис. 3.49, використання системи векторного керування дозволяє точно дотримуватися задання швидкості незалежно від зміни моменту навантаження на валу двигуна (порівняно з характеристикою на базі закону скалярного керування, рис. 3.38).

Розроблена модель векторного керування асинхронним двигуном не обмежується цим типом електроприводу. Побудована система є універсальною – замість асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором у робочий простір Ansys Twin Builder з Ansys Maxwell 2D/3D можна імпортувати ROM-об'єкт електродвигуна будь-якого іншого типу – асинхронний або синхронний.

Крім того, розглянута система з незначними змінами може бути використана для стабілізації швидкості обертання генераторів вітроелектростанцій та гідроустановок.

Використання системи векторного керування має на порядок вищу точність підтримки швидкості, а отримані результати моделювання добре узгоджуються з експериментальними. Електродвигун, взятий за прототип для імітаційного моделювання, відноситься до загальнопромислової серії і для

нього існує багато протоколів заводських випробувань, що в цілому дозволило верифікувати модель.

3.4.5 Керування двигуном постійного струму. У даній роботі для керування електроприводами газового пальника розглядаються двигуни постійного струму з постійними магнітами [134, 135]. Проте можуть використовуватись і двигуни з обмотками збудження (паралельного або послідовного), що окремо розглянуто в роботі автора [117].

У середовищі Ansys Twin Builder модель представляє машину постійного струму з постійним збудженням як компонент зосередженої схеми. Система рівнянь реалізована за умови ненасиченої магнітної системи.

Припущення моделі моделей машин постійного струму:

- Нелінійне магнітне коло (машина постійного струму з нелінійним електричним збудженням) здатне враховувати залежність від потоку збудження та індуктивності, спричинених струмом збудження.
- Коло якоря та збудника моделі машини постійного струму вважаються повністю роз'єднаними;
- Не враховуються ефекти насичення на осі q , спричинені струмом якоря;
- Не враховується реакція якоря на поле збудження;
- Не враховуються втрати на вихровий струм і гістерезис, спричинені обертанням якоря та системою живлення пульсуючим струмом;
- Втрати на тертя (паразитні моменти) не враховуються в моделі – їх можна додати з зовнішнім параметром крутного моменту навантаження.

У розробленій моделі двигун постійного струму з постійними магнітами приводиться в дію від комутованого джерела постійного струму. Структурна схема моделі на рис. 3.50 показує живлення, перемикаючий транзистор і підключення двигуна. На рис. 3.51 показана блок-схема системи керування для вибірки швидкості двигуна та створення сигналу TR_Control, який використовується для керування затвором транзистора для забезпечення належної середньої напруги для утримання двигуна на швидкості.

Результати моделювання показані на рис. 3.50 – 3.53.

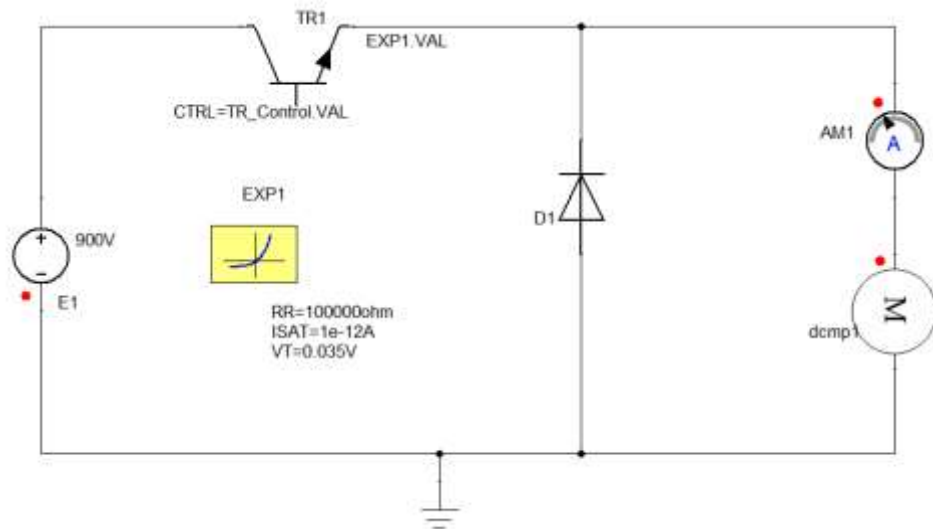


Рисунок 3.50 – Імітаційна модель двигуна постійного струму з постійними магнітами в ANSYS Twin Builder: силова частина

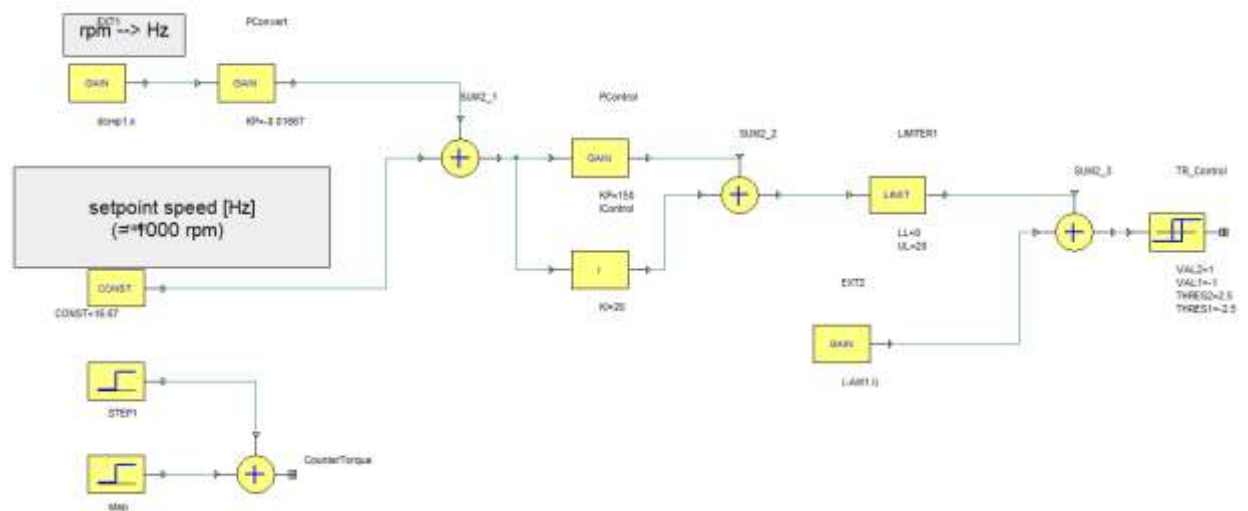


Рисунок 3.51 – Імітаційна модель двигуна постійного струму з постійними магнітами в ANSYS Twin Builder: система керування

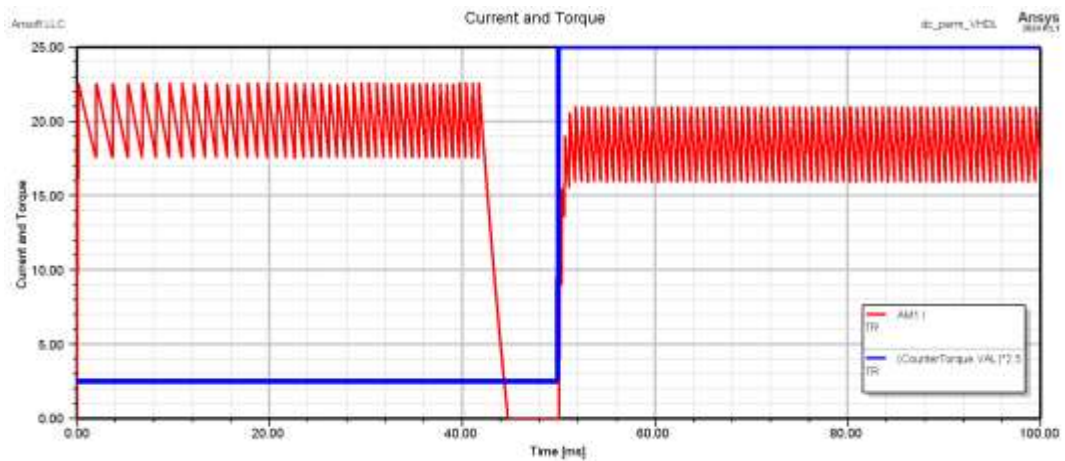


Рисунок 3.52 – Результати моделювання двигуна постійного струму з постійними магнітами в ANSYS Twin Builder: струм і момент

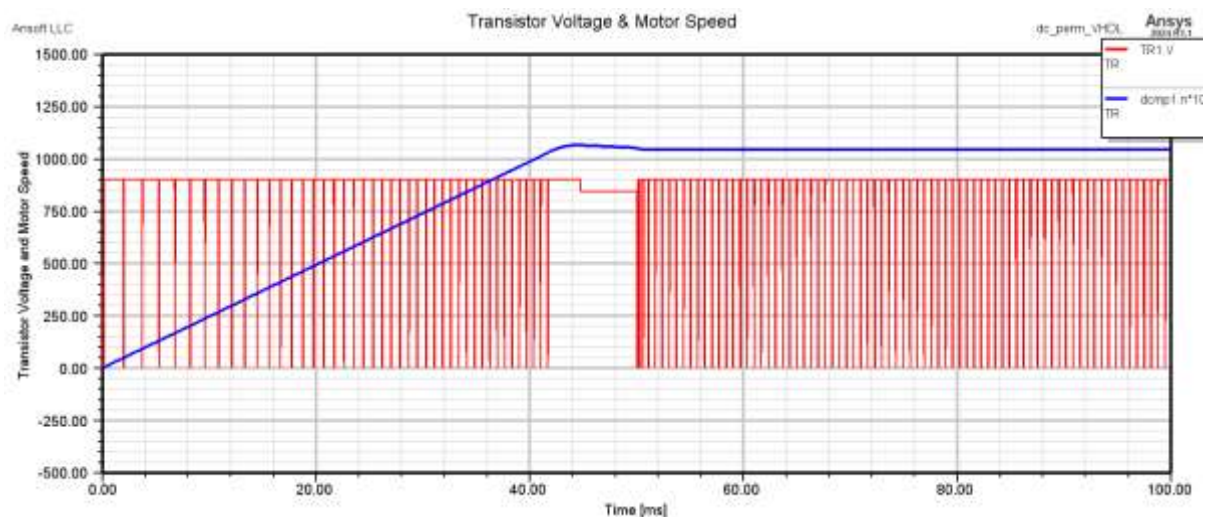


Рисунок 3.53 – Результати моделювання двигуна постійного струму з постійними магнітами в ANSYS Twin Builder: напруга транзистора і швидкість

Результати моделювання (рис. 3.52 – 3.53) свідчать про прийнятні параметри контролю роботи двигуна постійного струму з постійними магнітами по відношенню до опорного сигналу, а розроблена імітаційна модель є складовою частиною зі створення цифрових близнюків загальної системи керування режимами роботи газового пальника у циклах технологічного процесу виробництва цементних сумішей.

3.5 Інтелектуальна система керування режимами сушильного агрегату на основі генетичного алгоритму

3.5.1 Формалізація задачі генетичної оптимізації технологічних параметрів

У сучасних автоматизованих системах керування промисловими сушильними агрегатами одним із найбільш складних завдань є оперативне визначення раціонального режиму роботи за умов змінного технологічного навантаження та впливу зовнішніх збурень. На відміну від класичних задач регулювання, у даному випадку необхідно одночасно враховувати теплотехнічні, газодинамічні та електромеханічні процеси, що взаємопов'язані між собою та характеризуються нелінійною поведінкою.

У межах розробленої імітаційної моделі для підвищення рівня інтелектуалізації системи запропоновано використання генетичного алгоритму як засобу багатокритеріальної оптимізації режимів сушіння.

Задача оптимізації полягає у визначенні такого набору технологічних параметрів сушильного агрегату, який забезпечує мінімальне енергоспоживання та стабільне досягнення нормативної вологості цементної суміші.

Ефективність функціонування сушильного агрегату при виробництві цементних сумішей безпосередньо визначається точністю підтримання технологічних параметрів та здатністю системи керування адаптуватися до змін зовнішніх і внутрішніх факторів. До основних дестабілізуючих впливів належать коливання вологості вхідної сировини, зміна продуктивності подачі матеріалу, нестабільність тиску та витрати газу, а також варіація теплового навантаження у робочому об'ємі сушильного агрегату. За наявності таких впливів класичні підходи до регулювання, засновані на фіксованих або локально адаптивних законах керування, не завжди забезпечують одночасне досягнення необхідної якості сушіння, енергоефективності та стійкості технологічного процесу.

З огляду на це виникає необхідність застосування інтелектуального методу оптимізації, здатного здійснювати пошук раціональних режимів роботи в багатовимірному просторі параметрів та враховувати взаємний вплив окремих складових технологічного процесу. Одним із найбільш ефективних підходів до розв'язання подібних задач є використання генетичного алгоритму, який належить до класу еволюційних методів оптимізації та дозволяє знаходити наближено оптимальні рішення за умов складної нелінійної поведінки системи.

Формалізація задачі генетичної оптимізації в межах даного дослідження ґрунтується на побудові математичної моделі стану сушильного агрегату як багатопараметричної системи, в якій керовані величини впливають на критерії ефективності. Вектор технологічного стану визначається співвідношенням

$$X(t) = \begin{bmatrix} T(t) \\ Q_g(t) \\ n_f(t) \\ \alpha(t) \\ F(t) \\ W(t) \end{bmatrix}, \quad (3.1)$$

де $T(t)$ – температура теплоносія в барабані сушильного агрегату, °C; $Q_g(t)$ – витрата природного газу, м³/год; $n_f(t)$ – частота обертання вентилятора, об/хв; $\alpha(t)$ – кут відкриття шиберу повітрязабірника; $F(t)$ – продуктивність подачі сировини, кг/год; $W(t)$ – поточна вологість матеріалу.

У межах задачі оптимізації частина цих параметрів виступає як керовані змінні, а частина – як контрольовані вихідні величини (рис. 3.54).

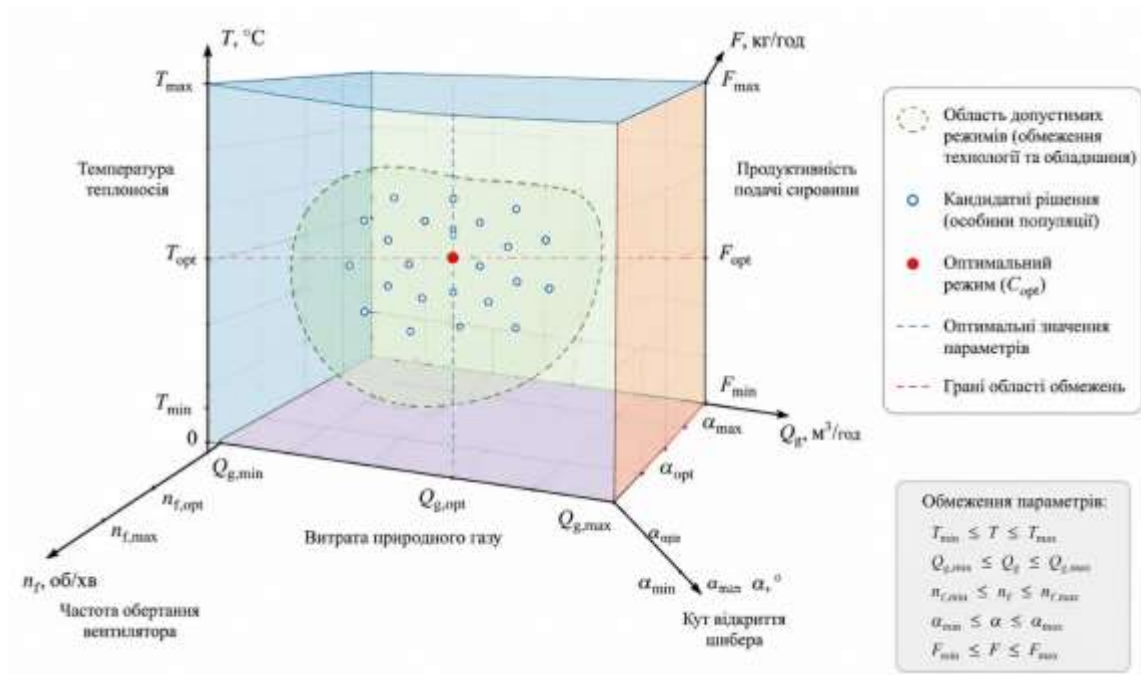


Рисунок 3.54 – Простір технологічних параметрів сушильного агрегату як область генетичної оптимізації

Керуючий вплив описується вектором

$$U(t) = \begin{bmatrix} Q_g(t) \\ n_f(t) \\ \alpha(t) \\ F(t) \end{bmatrix}. \quad (3.2)$$

При цьому температура теплоносія та кінцева вологість є результатом взаємодії процесів горіння, конвективного теплообміну та транспорту матеріалу в барабані.

Математична постановка задачі передбачає визначення такого керуючого вектора U , за якого забезпечується мінімум цільової функції:

$$J(U) \rightarrow \min. \quad (3.3)$$

Цільова функція формується як зважена сума декількох критеріїв:

$$J = w_{1E} + w_{2\Delta W} + w_{3\sigma_T} + w_{4\sigma_S}, \quad (3.4)$$

де E – сумарне енергоспоживання системи; ΔW – відхилення кінцевої вологості від нормативного значення; σ_T – середньоквадратичне відхилення температури в зоні сушіння; σ_S – інтегральний показник нестабільності технологічного режиму; w_1, w_2, w_3, w_4 – вагові коефіцієнти.

Цільова функція генетичного алгоритму сформована як багатокритеріальний показник, що враховує основні технологічні та енергетичні характеристики процесу сушіння. Кожен критерій відображає окремий аспект ефективності роботи сушильного агрегату та впливає на якість отриманого результату.

Першим критерієм є енергоспоживання системи E . До його складу входять витрати електричної енергії електроприводами вентилятора, барабана та допоміжних механізмів, а також витрати природного газу на підтримання необхідного теплового режиму. Мінімізація цього показника дозволяє зменшити собівартість процесу сушіння та підвищити енергоефективність технологічного обладнання.

Другим критерієм є відхилення температури сушіння від заданого технологічного значення ΔW . Надмірне підвищення температури може призводити до перегрівання матеріалу та перевитрати палива, тоді як недостатня температура погіршує якість сушіння та збільшує тривалість технологічного циклу. Тому генетичний алгоритм прагне підтримувати температурний режим у допустимих межах.

Третім критерієм є відхилення кінцевої вологості матеріалу від заданого значення. Саме цей параметр безпосередньо характеризує якість процесу сушіння. Мінімізація похибки вологості забезпечує отримання продукції зі

стабільними фізико-механічними характеристиками та знижує ймовірність браку.

Додатково до цільової функції включаються обмеження на максимальну температуру, витрату газу, швидкість обертання барабана та продуктивність вентилятора, що забезпечує роботу системи в межах допустимих технічних характеристик обладнання.

Вагові коефіцієнти цільової функції визначалися на основі експертної оцінки впливу окремих критеріїв на ефективність роботи сушильного агрегату та якість кінцевого продукту. При виборі коефіцієнтів враховувалися технологічні вимоги до процесу сушіння цементної сировини, енергетичні показники обладнання та необхідність забезпечення стабільності режимів роботи.

Найбільшу вагу було надано критерію відхилення кінцевої вологості матеріалу від заданого значення (w_3), оскільки саме цей параметр безпосередньо визначає якість продукції та ефективність процесу сушіння. Другою за важливістю складовою є енергоспоживання системи (w_1), яке визначає економічну ефективність експлуатації сушильного агрегату. Відхилення температури сушіння (w_2) впливає на швидкість видалення вологи та стабільність технологічного процесу, тоді як показник стабільності режиму роботи (w_4) забезпечує обмеження різких змін керуючих впливів і зменшення динамічних навантажень на виконавчі механізми.

Початкові значення вагових коефіцієнтів визначалися експертним шляхом, після чого уточнювалися за результатами серії імітаційних експериментів. У процесі моделювання виконувалася оцінка чутливості цільової функції до зміни окремих коефіцієнтів, що дозволило встановити їх раціональні значення. За результатами дослідження були прийняті значення $w_1 = 0,30$, $w_2 = 0,20$, $w_3 = 0,40$ та $w_4 = 0,10$, які забезпечили найкращий компроміс між енергоефективністю, якістю сушіння та стабільністю роботи системи.

Структурну схему формування цільової функції оптимізації, яка враховує взаємозв'язок між керованими параметрами сушильного агрегату, частковими критеріями ефективності та інтегральним показником якості функціонування системи, наведено на рис. 3.55.

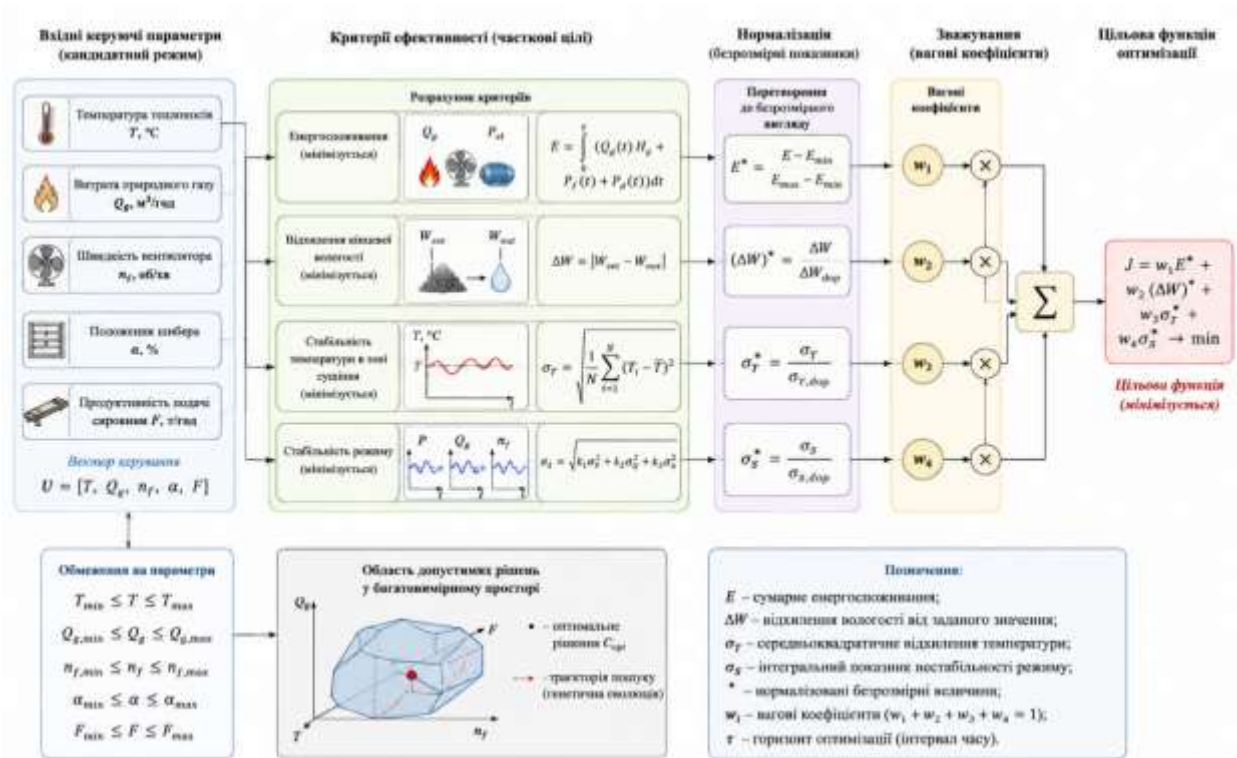


Рисунок 3.55 – Структурна схема формування цільової функції оптимізації

Представлена схема ілюструє послідовність переходу від вхідних технологічних параметрів до обчислення часткових критеріїв, їх нормалізації та формування узагальненого оптимізаційного критерію, що використовується в генетичному алгоритмі під час оцінювання кожної особини популяції.

Складова енергоспоживання враховує витрати природного газу та електричну потужність електроприводів:

$$E = \int_{\{0\}}^{\{\tau\}} (Q_{g(t)} \cdot H_g + P_{f(t)} + P_{d(t)}) dt, \quad (3.5)$$

де H_g – теплота згоряння газу; $P_f(t)$ – електрична потужність вентилятора; $P_d(t)$ – потужність приводу шибера; τ – часовий інтервал аналізу.

Відхилення вологості визначається виразом

$$\Delta W = |W_{\{set\}} - W_{\{out\}}|, \quad (3.6)$$

де W_{set} – нормативне значення кінцевої вологості; W_{out} – фактичне значення на виході сушильного агрегату.

Температурна стабільність оцінюється за формулою

$$\sigma_T = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (T_i - \bar{T})^2}, \quad (3.7)$$

де T_i – поточне значення температури; $\bar{T}$ – середнє значення температури; N – кількість вимірювань.

Інтегральний показник стабільності технологічного процесу визначається як

$$\sigma_S = \sqrt{k_1 \sigma_P^2 + k_2 \sigma_Q^2 + k_3 \sigma_n^2}, \quad (3.8)$$

де σ_P – відхилення тиску, σ_Q – коливання витрати газу, σ_n – варіація швидкості вентилятора.

Оскільки робота сушильного агрегату має технічні обмеження, задача доповнюється системою нерівностей

$$T_{min} \leq T \leq T_{max} \quad (3.9)$$

$$Q_{g,min} \leq Q_g \leq Q_{g,max}$$

$$n_{f,min} \leq n_f \leq n_{f,max}$$

$$\alpha_{min} \leq \alpha \leq \alpha_{max}$$

$$F_{min} \leq F \leq F_{max}$$

Обмеження формуються відповідно до конструктивних характеристик газового пальника, допустимих режимів електроприводів та вимог технології виробництва цементних сумішей.

Особливістю задачі є відсутність лінійної залежності між керуючими параметрами та результатом. Збільшення витрати газу може покращувати швидкість сушіння, але одночасно призводити до перевищення температурного режиму. Підвищення швидкості вентилятора впливає на інтенсивність подачі повітря, але змінює динаміку горіння та структуру теплового поля. Таким чином система характеризується нелінійністю, багатозв'язністю та наявністю суперечливих критеріїв.

Для подальшої реалізації генетичного алгоритму вводиться поняття вектора параметрів-кандидатів:

$$C_i = [T_i \quad Q_{g,i} \quad n_{f,i} \quad \alpha_i \quad F_i]. \quad (3.10)$$

Кожен такий вектор описує окремий режим функціонування сушильного агрегату. Сукупність кандидатів формує популяцію

$$P = \{C_1, C_2, \dots, C_N\}, \quad (3.11)$$

де N – кількість особин у поколінні.

Для кожної особини здійснюється моделювання режиму в інтегрованому середовищі Ansys Twin Builder з використанням результатів, отриманих раніше у Ansys Fluent та Maxwell. Це дозволяє оцінити температуру

в робочій зоні, реакцію електроприводів, зміну вологості та прогнозоване енергоспоживання без переходу до реального фізичного експерименту.

У такій постановці задача набуває вигляду багатокритеріальної оптимізації:

$$C_{opt} = \arg \min_{C \in P} J(C), \quad (3.12)$$

де C_{opt} – оптимальний вектор режиму.

На відміну від градієнтних алгоритмів, генетичний підхід не потребує безперервності функції або аналітичного визначення похідних. Це має суттєве значення, оскільки математична модель сушильного агрегату містить дискретні переходи режимів, часові затримки, нелінійні характеристики виконавчих механізмів та залежності, отримані шляхом чисельного моделювання.

Для оцінювання чутливості цільової функції до зміни основних технологічних параметрів було виконано серію імітаційних розрахунків у середовищі Ansys Twin Builder із використанням раніше сформованої багатофізичної моделі сушильного агрегату. У межах дослідження аналізувався вплив температури теплоносія та витрати природного газу на значення інтегрального критерію ефективності за фіксованих параметрів роботи вентилятора, положення шиберу повітрязбірника та продуктивності подачі матеріалу. Такий підхід дозволяє виявити характер зміни цільової функції у багатовимірному просторі параметрів та визначити області найбільш ефективних режимів функціонування.

Отримані результати наведено на рис. 3.56. Просторова поверхня відображає залежність інтегрального критерію ефективності від температури теплоносія та витрати газу, а також дозволяє візуально визначити зону мінімального значення цільової функції.

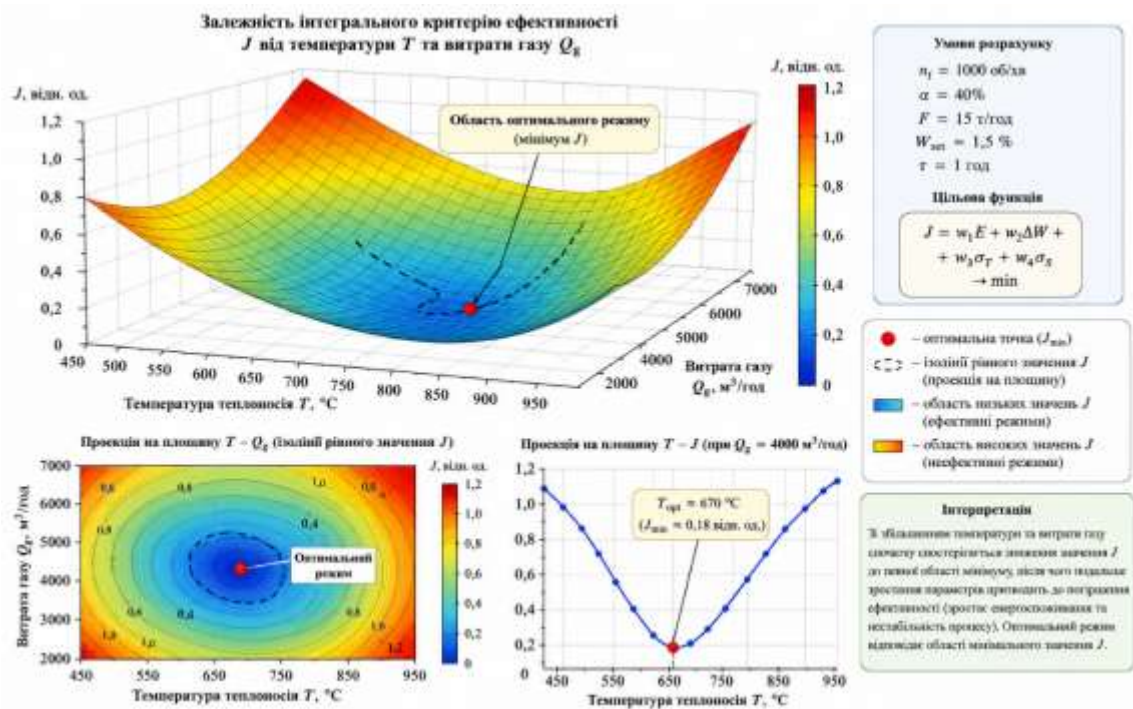


Рисунок 3.56 – Залежність інтегрального критерію ефективності від зміни температури та витрати газу

Нижня проєкція поверхні у вигляді ізоліній демонструє конфігурацію області допустимих та раціональних режимів, а переріз по температурі дозволяє оцінити характер зміни критерію в окремому напрямку простору оптимізації.

Аналіз представленої залежності свідчить, що зі збільшенням температури теплоносія та витрати природного газу значення інтегрального критерію спочатку зменшується, досягаючи області локального мінімуму, після чого знову зростає внаслідок збільшення енергетичних витрат та погіршення стабільності технологічного режиму. Наявність чітко вираженої області мінімуму підтверджує можливість формалізації задачі пошуку оптимального режиму як задачі багатокритеріальної оптимізації та обґрунтовує доцільність використання генетичного алгоритму як ефективного інструмента навігації у просторі допустимих параметрів.

Окрему увагу в межах формалізації задачі приділено часовому фактору. Реальна система працює у змінному режимі, тому оптимізація виконується не

для статичного стану, а для ковзного інтервалу часу. Для цього вводиться функціонал

$$J_{\tau} = \frac{1}{\tau} \int_t^{t+\tau} J(U(t)) dt, \quad (3.13)$$

що дозволяє оцінювати ефективність не лише миттєвого режиму, а й його поведінку протягом технологічного циклу.

Сформований генетичний алгоритм у межах даної роботи формалізується як метод мінімізації функціоналу J_{τ} у просторі допустимих технологічних параметрів із урахуванням нелінійної багатофізичної моделі сушильного агрегату та встановлених технологічних обмежень.

Результатом роботи генетичного алгоритму є набір оптимальних параметрів керування сушильним агрегатом, до яких належать рекомендована температура сушіння, продуктивність вентилятора, положенняшибера повітрозабірника, витрата газу та швидкість обертання барабана. Отримані значення використовуються як керуючі уставки для системи автоматизації, реалізованої на базі програмованого логічного контролера Schneider Electric Modicon M241.

У процесі експлуатації поточні значення температури, вологості матеріалу, витрати газу та інших технологічних параметрів надходять від датчиків до контролера та промислового комп'ютера. Генетичний алгоритм виконує перерахунок оптимальних режимів роботи та формує нові уставки для виконавчих механізмів. Після цього через частотні перетворювачі ATV930 і ATV320 здійснюється корекція швидкості обертання вентилятора та барабана, а також змінюється положенняшибера і параметри подачі газу до пальника. Завдяки цьому забезпечується адаптація сушильного агрегату до змін вологості сировини, продуктивності установки та зовнішніх умов експлуатації.

Розроблений підхід створює замкнений контур інтелектуального керування, у якому результати оптимізації безпосередньо впливають на режими роботи технологічного обладнання, а нові вимірні параметри використовуються для подальшого уточнення оптимального рішення.

Запропонована постановка задачі є основою подальшого моделювання механізму генетичної еволюції, визначення структури хромосом, операторів селекції, схрещування та мутації, що розглядаються в наступному підрозділі. Отримана математична модель дозволяє пов'язати параметри системи керування з критеріями ефективності сушіння та забезпечує формальне підґрунтя для реалізації інтелектуального пошуку оптимального режиму роботи сушильного агрегату в умовах реального промислового виробництва.

3.5.2 Модель хромосоми та еволюційні оператори

Після формалізації задачі оптимізації наступним етапом є побудова внутрішньої структури генетичного алгоритму, що визначає спосіб представлення технологічного режиму сушильного агрегату у вигляді генетичного коду та правила еволюційного перетворення кандидатних рішень.

На відміну від класичних методів параметричної оптимізації, генетичний алгоритм працює з популяцією альтернативних режимів, кожен із яких розглядається як окрема особина з власним набором технологічних параметрів. Такий підхід дозволяє паралельно досліджувати декілька напрямків пошуку та забезпечує адаптивний вибір найбільш ефективних конфігурацій роботи сушильного агрегату.

Основою реалізації є представлення кожного режиму у вигляді хромосоми, яка містить набір параметрів, безпосередньо пов'язаних із технологічним процесом сушіння та керуванням газовим пальником.

Структурне представлення технологічного режиму у вигляді хромосоми є базовим елементом генетичного алгоритму, оскільки саме така форма кодування забезпечує подальше застосування механізмів селекції, комбінування та випадкової мутації. У межах розробленої моделі кожен ген

відповідає конкретному фізичному параметру системи, що бере участь у процесі оптимізації. На рис. 3.57 показано структуру хромосоми, що використовується для опису одного кандидатного режиму роботи сушильного агрегату.

Генетичний код містить п'ять основних генів, які відповідають температурі теплоносія, витраті природного газу, частоті обертання вентилятора, положеннюшибера та продуктивності подачі сировини. Така структура дозволяє безпосередньо пов'язати кожен елемент генетичного коду з конкретною фізичною величиною. Водночас забезпечується незалежна зміна окремих параметрів під час мутації та можливість комбінування окремих фрагментів під час схрещування. Обрана модель є достатньо компактною для швидкого опрацювання в імітаційному середовищі та водночас охоплює всі ключові змінні, що впливають на ефективність сушіння.

Після формування початкової популяції кожна особина оцінюється відповідно до значення інтегрального критерію ефективності. На основі цієї оцінки виконується відбір найбільш перспективних рішень, які переходять до наступного етапу еволюційного циклу.

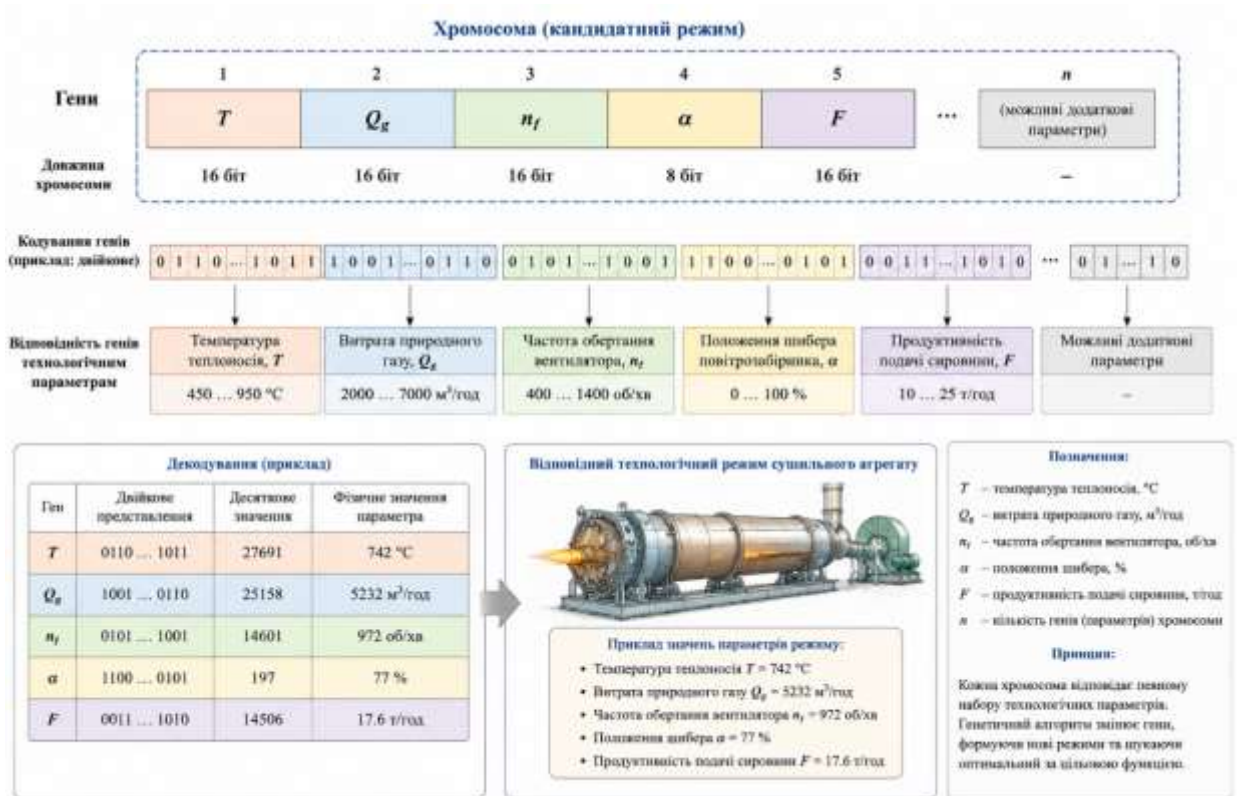


Рисунок 3.57 – Представлення технологічного режиму сушильного агрегату у вигляді генетичної хромосоми

У процесі реалізації використано принцип збереження найбільш пристосованих особин, що дозволяє поступово концентрувати пошук у напрямку найбільш ефективної області технологічного простору.

Процедура переходу між поколіннями включає відбір перспективних режимів, їх комбінування та формування нового набору кандидатних рішень. Для візуалізації цього процесу використовується структурна схема, яка відображає повний цикл генетичної еволюції. На рис. 3.58 наведено повний цикл еволюційного перетворення популяції.

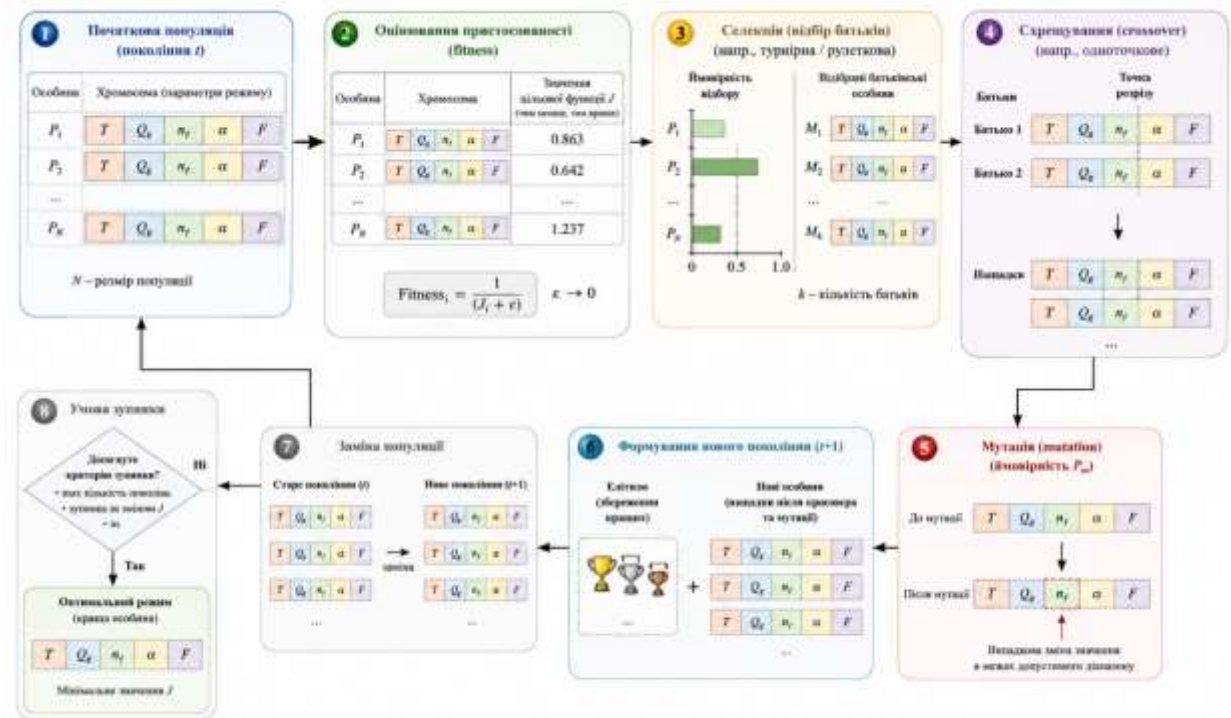


Рисунок 3.58 – Послідовність виконання селекції та формування нового покоління в генетичному алгоритмі

Початковий набір рішень проходить оцінювання на основі цільової функції, після чого найбільш ефективні особини переходять до етапу селекції. У результаті формується група батьківських рішень, які використовуються для створення нового покоління. Такий підхід забезпечує збереження найбільш ефективних конфігурацій та одночасне оновлення популяції. Важливою особливістю є циклічність процесу: кожне нове покоління знову проходить оцінювання та відбір. Це дозволяє алгоритму поступово звужувати область пошуку та адаптуватися до складної багатокритеріальної задачі керування сушільним агрегатом.

На наступному етапі для відібраних батьківських особин застосовуються оператори схрещування та мутації. Саме вони забезпечують появу нових комбінацій технологічних параметрів та створюють умови для виходу з локальних екстремумів.

Оператори схрещування та мутації є основним механізмом генерації нових рішень у межах генетичного алгоритму. Їх використання забезпечує зміну окремих параметрів та створення нових комбінацій технологічних режимів. На рис. 3.59 представлено механізм формування нового рішення на основі двох батьківських особин.

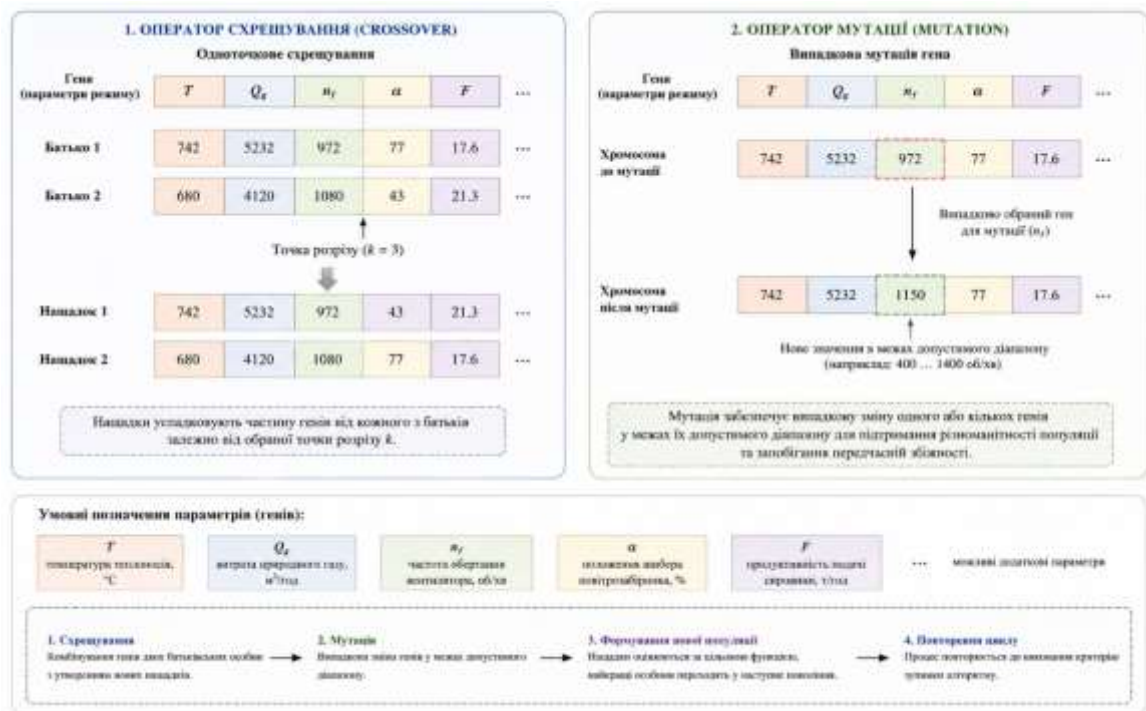


Рисунок 3.59 – Схема операторів схрещування та мутації генетичного алгоритму

Під час схрещування відбувається комбінування окремих генів, у результаті чого нова хромосома містить частину параметрів від кожного з батьків. Далі застосовується мутація, що передбачає випадкову зміну одного або кількох генів у межах допустимого технологічного діапазону. Саме цей етап є критично важливим для підтримання різноманітності популяції та запобігання передчасному переходу до локального оптимуму. Для сушильного агрегату це означає можливість оперативного пошуку нових режимів у разі зміни вологості сировини або зовнішніх збурень.

Для реалізації генетичного алгоритму в середовищі імітаційного моделювання використовувався алгоритм циклічного опрацювання популяції, що забезпечує автоматичне формування поколінь та оцінювання кожного кандидатного рішення.

Наведений алгоритм відображає загальну послідовність роботи генетичного пошуку. Після формування стартової популяції виконується оцінювання кандидатних режимів, відбір перспективних особин та створення нового покоління. Циклічне повторення цього процесу забезпечує поступове наближення до оптимального технологічного режиму. Використання такої структури добре інтегрується з розрахунковими модулями Ansys Twin Builder та дозволяє використовувати результати багатофізичного моделювання безпосередньо в контурі оптимізації.

Лістинг 3.1 – Фрагмент алгоритму реалізації генетичного пошуку оптимального режиму

```
Initialize population P
Evaluate fitness J for each chromosome

while termination_condition = false

    Select parent chromosomes

    Perform crossover

    Apply mutation

    Evaluate new generation

    Replace worst individuals

end while

Return optimal solution
```

Побудована модель хромосоми та реалізовані еволюційні оператори забезпечують формалізоване представлення технологічного режиму сушильного агрегату в межах генетичного алгоритму та створюють основу для адаптивного пошуку ефективних конфігурацій роботи системи. Поєднання структури генетичного коду з механізмами селекції, схрещування та мутації дозволяє забезпечити стійкий багатокритеріальний пошук у складному нелінійному просторі параметрів і формує основу для подальшого імітаційного дослідження ефективності алгоритму, що розглядається в наступному підрозділі.

3.5.3 Імітаційне дослідження роботи генетичного алгоритму

Після побудови математичної постановки задачі та формування структури генетичного алгоритму наступним етапом дослідження стало проведення імітаційного аналізу його роботи в умовах функціонування сушильного агрегату. Метою даного етапу є перевірка працездатності розробленої інтелектуальної системи оптимізації, оцінювання її збіжності в умовах багатопараметричного пошуку та визначення ефективності алгоритму при зміні технологічних режимів.

Імітаційне дослідження виконувалося в інтегрованому середовищі Ansys Twin Builder із використанням розробленої раніше багатофізичної моделі сушильного агрегату. До складу моделі входили підсистеми теплового процесу сушіння, газоповітряного тракту, електроприводу вентилятора, регулювання шибера повітрозабірника та вузла подачі сировини. У рамках моделювання генетичний алгоритм взаємодіє із цифровою моделлю в замкненому циклі, отримуючи поточні параметри технологічного процесу, оцінюючи їх відповідно до цільової функції та генеруючи нові керуючі впливи.

Дослідження виконувалося для ряду характерних режимів роботи сушильного агрегату, що відповідають реальним умовам виробничої експлуатації. Зокрема розглядалися режими стабільного сушіння при

номінальній вологості сировини, режим різкого збільшення вологості у вхідному матеріалі, режим зміни продуктивності подачі та режим короткочасного порушення подачі газу. Для кожного випадку оцінювались стійкість алгоритму, швидкість адаптації, характер збіжності та якість сформованого оптимального рішення.

На першому етапі імітаційного дослідження було проаналізовано зміну значення інтегральної функції ефективності у процесі переходу від початкової популяції до наступних поколінь.

Для наочного відображення процесу еволюційного пошуку побудовано графік зміни функції пристосованості за поколіннями, який дозволяє оцінити швидкість наближення до оптимального рішення та характер збіжності алгоритму (рис. 3.60).

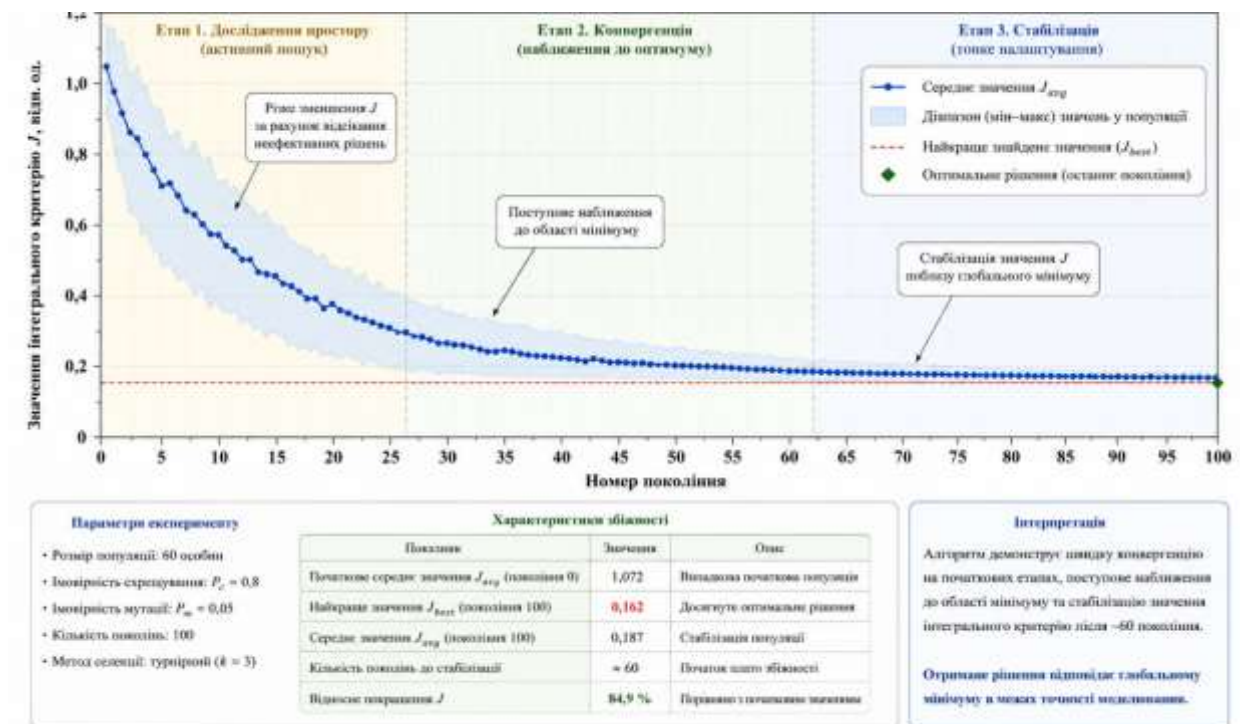


Рисунок 3.60 – Зміна значення інтегрального критерію ефективності в процесі еволюції популяції

Аналіз результатів, наведених на рис. 3.61, свідчить, що найбільш інтенсивне зменшення значення інтегрального критерію відбувається протягом перших поколінь, коли алгоритм виконує первинне дослідження простору можливих рішень. У цей період відбувається активне відсікання неефективних конфігурацій та концентрація пошуку в перспективній області параметрів. Надалі швидкість зміни поступово зменшується, а значення функції переходить у режим стабілізації. Такий характер збіжності є типовим для генетичних алгоритмів та підтверджує коректність реалізації еволюційного механізму. Важливо, що після певної кількості поколінь алгоритм досягає області стабільного мінімуму без хаотичних коливань, що свідчить про достатню збалансованість між операторами селекції та мутації. Отримана залежність підтверджує здатність розробленої інтелектуальної системи поступово формувати раціональний режим роботи сушильного агрегату в автоматичному режимі.

Для підтвердження практичної реалізації розробленого генетичного алгоритму в межах цифрової моделі сушильного агрегату було виконано імітаційне дослідження в середовищі Ansys Twin Builder. Реалізація здійснювалася шляхом інтеграції блоку генетичної оптимізації у структуру цифрового двійника з використанням параметризованої моделі технологічного процесу сушіння. При цьому програмне середовище забезпечувало одночасне виконання моделювання фізичних процесів, оцінювання значення цільової функції та еволюційне формування нових поколінь кандидатних рішень. Загальний вигляд програмної реалізації та результати виконання генетичного пошуку наведено на рис. 3.61. На цьому рисунку представлено робоче середовище Ansys Twin Builder із реалізованою моделлю сушильного агрегату та активованим модулем генетичної оптимізації.

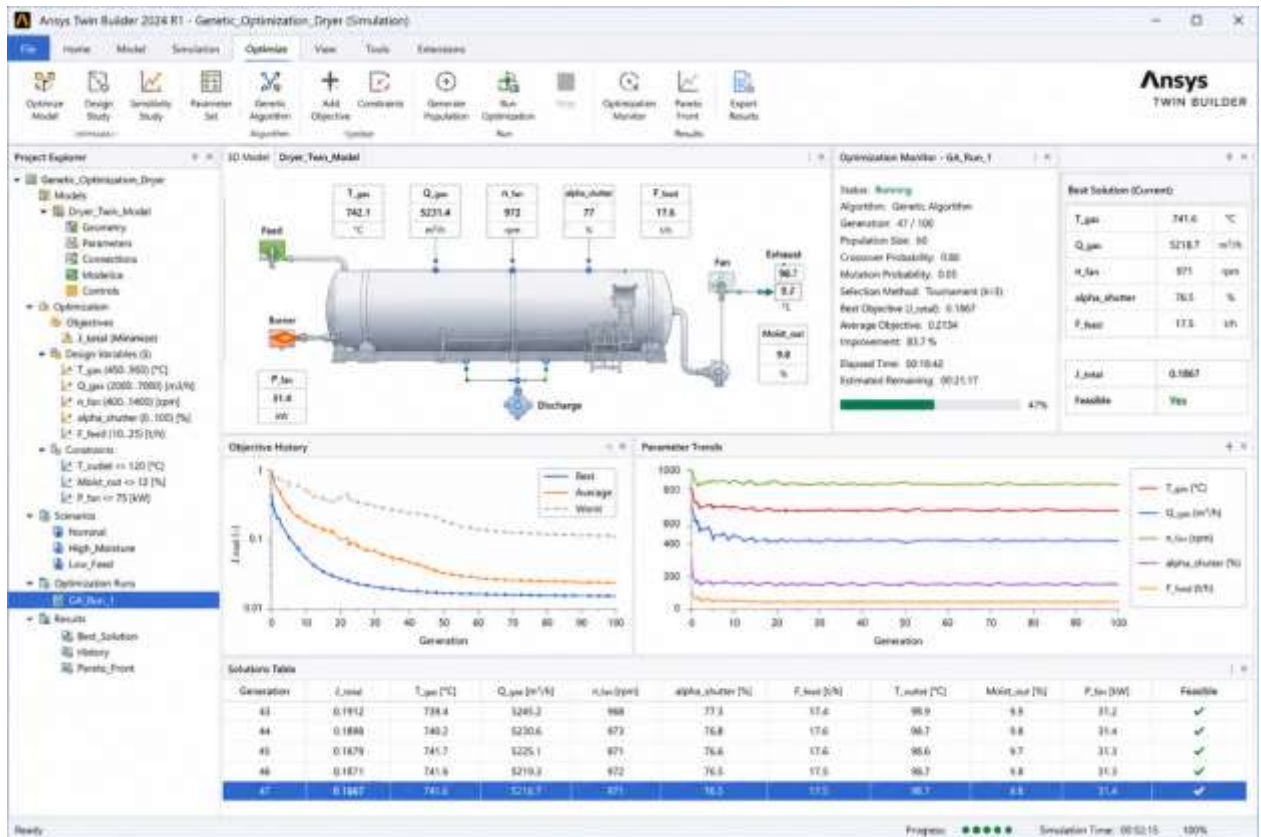


Рисунок 3.61 – Реалізація генетичної оптимізації параметрів сушильного агрегату в середовищі Ansys Twin Builder

У центральній частині інтерфейсу розташована цифрова модель сушильного агрегату з відображенням поточних технологічних параметрів, серед яких температура теплоносія, витрата природного газу, частота обертання вентилятора, положення шибера повітрязбірника та продуктивність подачі сировини. Такий підхід дозволяє в режимі моделювання одночасно контролювати фізичний стан об'єкта та зміну параметрів у процесі оптимізації.

У правій частині інтерфейсу відображається монітор виконання генетичного алгоритму, що містить інформацію про номер поточного покоління, розмір популяції, параметри операторів схрещування й мутації, а також поточне значення інтегрального критерію ефективності. Окремо наведено параметри найкращого знайденого рішення, які автоматично оновлюються під час еволюції популяції.

У нижній частині вікна подано графічну історію зміни значення цільової функції та тренди основних параметрів по поколіннях. Це дає змогу простежити процес збіжності алгоритму та оцінити характер адаптації кожного параметра до оптимального значення. Наявність таблиці розрахункових результатів додатково підтверджує, що процес оптимізації реалізовано як послідовний цикл оцінювання, порівняння та відбору рішень.

Представлена програмна реалізація підтверджує інтеграцію генетичного алгоритму безпосередньо в цифровий двійник сушильного агрегату та демонструє практичну можливість використання еволюційних методів у межах інтелектуальної системи керування. Отримані результати свідчать про те, що розроблений алгоритм функціонує як повноцінний оптимізаційний модуль, взаємодіє з математичною моделлю об'єкта в режимі реального часу та забезпечує формування раціонального технологічного режиму на основі аналізу поточного стану системи.

Наступним етапом дослідження стало порівняння енергетичних характеристик сушильного агрегату до та після застосування генетичного алгоритму. Оцінювалися витрати природного газу, електроспоживання вентилятора та сумарне енергоспоживання технологічного циклу. Результати порівняльного аналізу наведено на рис. 3.62.

На рис. 3.62 показано, що використання генетичного алгоритму дозволяє зменшити сумарне енергоспоживання системи без порушення технологічних параметрів сушіння. Найбільший ефект спостерігається в частині оптимізації витрат природного газу, оскільки алгоритм підбирає найбільш раціональне співвідношення між температурою теплоносія та обсягом газоподачі. Додатково знижується навантаження на електропривід вентилятора за рахунок адаптивного коригування швидкості обертання. Отриманий результат підтверджує, що інтелектуальна система виконує не лише підтримання режиму, а й функцію енергетичної оптимізації, формуючи більш ефективний режим у порівнянні з базовим алгоритмом керування.

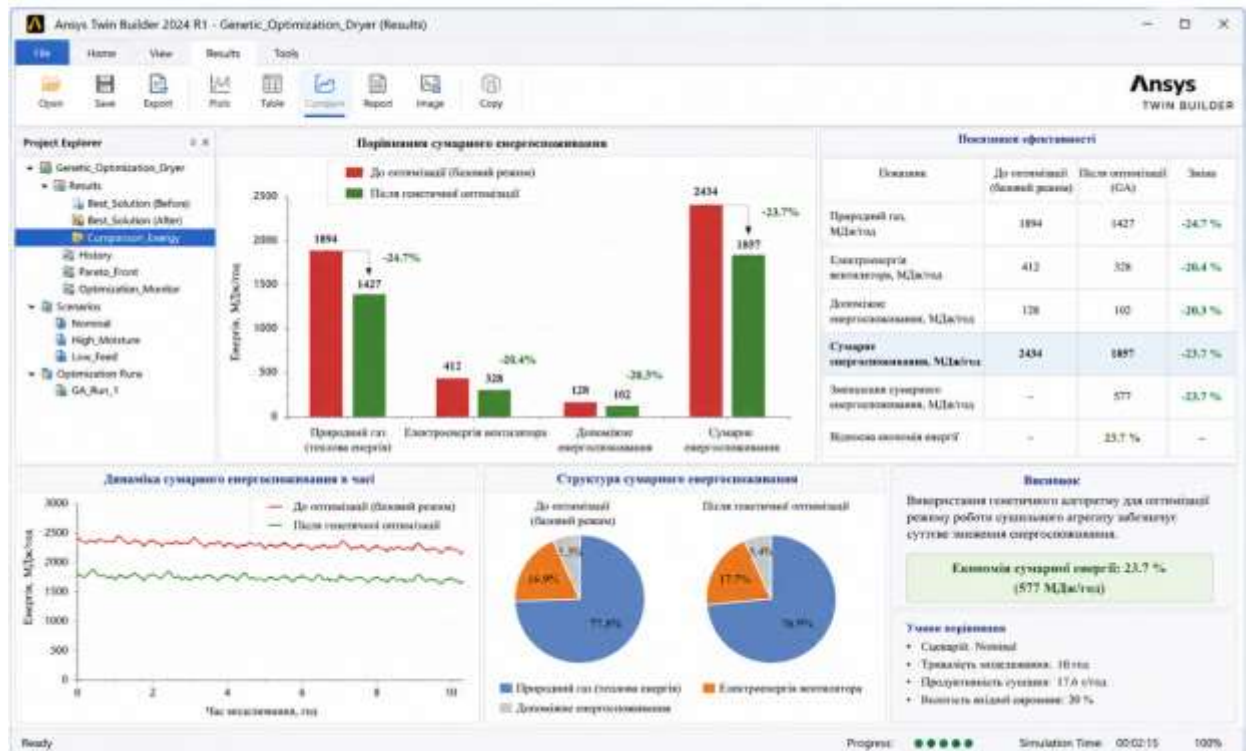


Рисунок 3.62 – Порівняльна характеристика енергоспоживання сушильного агрегату до та після генетичної оптимізації

Для аналізу роботи генетичного алгоритму в умовах різкої зміни параметрів сировини було змодельовано збільшення вологості вхідного матеріалу з одночасним контролем реакції системи керування. Результати наведено на рис. 3.63.

Аналіз графіка (рис. 3.64) показує, що в момент зміни вологості система фіксує відхилення контрольованого параметра та запускає новий цикл генетичної оптимізації. Після короткого перехідного процесу формується оновлений режим, що враховує новий стан технологічного середовища. У результаті температура теплоносія та витрата газу перебудовуються відповідно до змінених умов, а відхилення вологості на виході поступово повертається до допустимого діапазону. Характер переходу демонструє відсутність нестійких коливань та підтверджує здатність алгоритму адаптивно реагувати на збурення без втрати керованості.

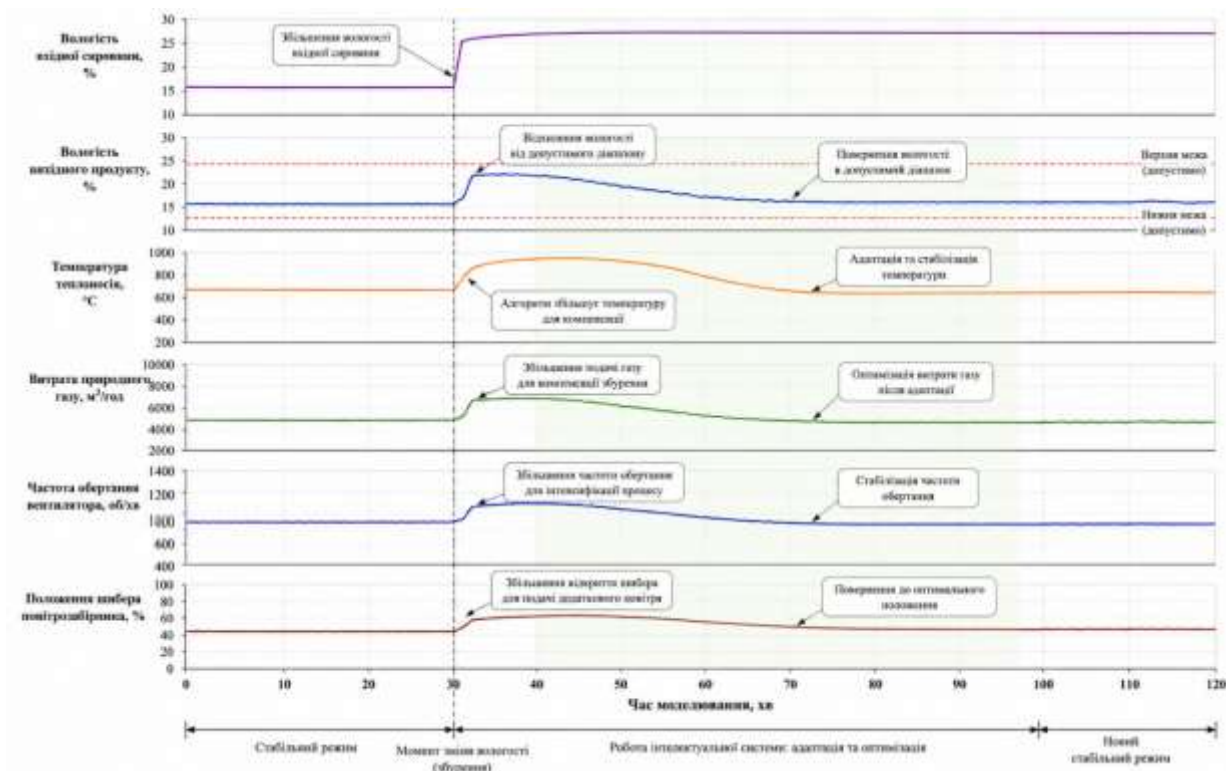


Рисунок 3.63 – Реакція інтелектуальної системи на зміну вологості вхідної сировини

Додатково в межах імітаційного дослідження оцінювався вплив чисельності популяції та інтенсивності мутації на швидкість збіжності. Було встановлено, що при недостатній кількості особин зменшується різноманітність пошуку, що підвищує ризик передчасної локальної збіжності. Надмірне збільшення популяції призводить до зростання часу обчислення без суттєвого покращення результату. Оптимальним виявився діапазон середньої чисельності популяції, який забезпечував компроміс між швидкістю розрахунку та якістю сформованого рішення.

Аналогічний ефект спостерігався під час аналізу ймовірності мутації. При занадто низькому значенні алгоритм швидко переходив у локальний оптимум. Надмірне збільшення мутації створювало надлишкову випадковість і сповільнювало стабілізацію. Найкращі результати були отримані за середнього рівня мутації, що забезпечував достатню різноманітність і водночас стабільне наближення до оптимального режиму.

Проведені імітаційні дослідження підтвердили, що генетичний алгоритм у складі цифрової моделі сушильного агрегату здатний виконувати інтелектуальний багатокритеріальний пошук раціональних режимів роботи в автоматичному режимі. На відміну від класичних методів параметричного регулювання, запропонований підхід не обмежується підтриманням заданої уставки, а виконує прогностно-адаптивне формування режиму з урахуванням поточного стану технологічного процесу.

Отримані результати дозволяють зробити висновок, що інтеграція генетичного алгоритму в структуру цифрової моделі є ефективним інструментом інтелектуалізації системи керування сушильним агрегатом. Розроблений алгоритм демонструє стабільну збіжність, забезпечує адаптацію до зовнішніх збурень та формує більш енергоефективні режими порівняно з традиційним способом керування. Саме це підтверджує практичну реалізацію в роботі елементів інтелектуальної системи та створює основу для подальшого впровадження алгоритму у реальну автоматизовану систему керування, що розглядається в наступному розділі дисертаційного дослідження.

3.6 Перевірка адекватності розроблених моделей

Для оцінки достовірності отриманих результатів було виконано перевірку адекватності розроблених математичних та імітаційних моделей шляхом порівняння результатів моделювання з паспортними характеристиками обладнання та розрахунковими значеннями технологічних параметрів.

Перевірка електромеханічної частини проводилася для моделей електроприводів, реалізованих у середовищах Ansys Maxwell та Ansys Twin Builder. Як контрольні параметри використовувалися номінальна частота обертання двигунів, електромагнітний момент, струм статора та споживана потужність. Встановлено, що розбіжність між результатами моделювання та паспортними даними не перевищує 5 %, що свідчить про достатню точність моделей для дослідження режимів роботи сушильного агрегату.

Для газодинамічної моделі в середовищі Ansys Fluent виконано порівняння температурних полів та швидкостей повітряних потоків з розрахунковими значеннями, отриманими за відомими залежностями тепло- та масообміну. Максимальна відносна похибка не перевищувала 7 %, що підтверджує коректність опису процесів горіння та теплообміну.

Результати моделювання були також використані як вхідні дані для інтегрованої моделі системи керування в середовищі Ansys Twin Builder. Узгодженість параметрів на всіх рівнях моделювання підтвердила можливість використання розроблених моделей для дослідження процесів оптимізації та побудови інтелектуальної системи керування сушильним агрегатом.

Перед використанням розроблених математичних та імітаційних моделей для дослідження режимів роботи сушильного агрегату та реалізації генетичного алгоритму оптимізації було виконано оцінку їх адекватності. Перевірка проводилася шляхом порівняння результатів моделювання з паспортними характеристиками обладнання, розрахунковими даними та технологічними параметрами, що використовуються під час експлуатації сушильних установок. Основною метою перевірки було визначення ступеня відповідності моделей реальним фізичним процесам та оцінка можливості їх подальшого використання для синтезу системи інтелектуального керування. Результати порівняння наведено в табл. 3.4.

Таблиця 3.4 – Результати перевірки адекватності моделей

Параметр	Паспортне значення	Модель	Відхилення, %
Швидкість АД	1500 об/хв	1468 об/хв	2,1
Момент АД	38 Н·м	39,2 Н·м	3,2
Струм АД	8,4 А	8,1 А	3,6
Температура сушіння	850 °С	812 °С	4,5
Швидкість потоку	12 м/с	11,4 м/с	5,0

Аналіз наведених результатів показує, що відхилення між значеннями, отриманими за допомогою математичних та імітаційних моделей, і контрольними значеннями не перевищує допустимих меж для інженерних розрахунків. Найбільша похибка спостерігається для параметрів теплообміну та газодинаміки, що пояснюється складністю опису турбулентних процесів та впливом зовнішніх факторів. Середня відносна похибка моделювання становить менше 5 %, що підтверджує адекватність розроблених моделей та можливість їх використання для подальшої оптимізації режимів роботи сушильного агрегату і формування керуючих впливів в інтелектуальній системі керування.

Для оцінки достовірності отриманих результатів було виконано порівняння значень основних технологічних параметрів, отриманих під час моделювання, з контрольними значеннями, визначеними на основі паспортних характеристик обладнання та інженерних розрахунків. Особливу увагу приділено параметрам, які безпосередньо впливають на якість сушіння та енергоефективність технологічного процесу. Результати такого порівняння наведено на рис. 3.64.

Як видно з рис. 3.64, результати математичного та імітаційного моделювання добре узгоджуються з контрольними значеннями основних технологічних параметрів сушильного агрегату. Найменші відхилення спостерігаються для параметрів електромеханічної підсистеми, зокрема швидкості обертання електроприводів та струмів двигунів. Дещо більша похибка характерна для параметрів теплообміну та газодинамічних процесів, що пояснюється складністю опису турбулентних потоків та особливостями процесу горіння.

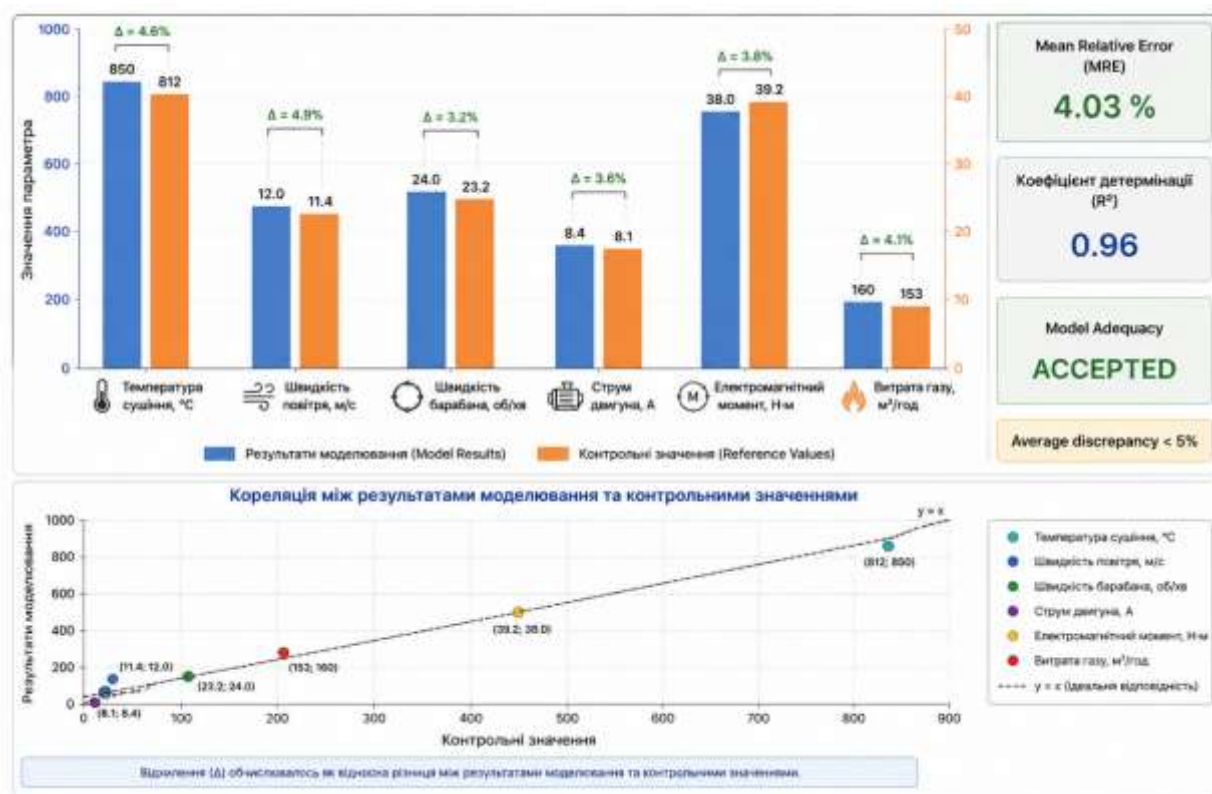


Рисунок 3.64 – Порівняння результатів математичного моделювання та контрольних значень технологічних параметрів сушильного агрегату

Отримані результати підтверджують коректність прийнятих припущень та математичного апарату, використаного під час побудови моделей у середовищах Ansys Fluent, Ansys Maxwell та Ansys Twin Builder. Встановлено, що розбіжність між результатами моделювання та контрольними значеннями не перевищує допустимих меж для інженерних розрахунків і не впливає на можливість використання моделей для дослідження режимів роботи сушильного агрегату.

3.7 Висновки до розділу 3

У третьому розділі було виконано імітаційне моделювання складових систем газового пальника із використанням сучасного програмного забезпечення Ansys Twin Builder, Ansys RMXprt, Ansys Maxwell та Ansys Fluent. Розроблені моделі забезпечили комплексний підхід до аналізу

електромеханічних, газодинамічних і керуючих процесів у системі автоматизації пальника.

Одним із досягнень роботи є моделювання асинхронних двигунів та двигунів постійного струму з постійними магнітами (BLDC) в Ansys RMxprt та їх подальший електромагнітний аналіз у Ansys Maxwell. Отримані результати, включаючи криві крутного моменту, струмів та потужності, були використані для створення моделей двигунів у вигляді ROM (Reduced Order Model)-об'єктів у Twin Builder. Цей підхід забезпечив високу точність і реалістичність моделювання, оскільки моделі враховують параметри конкретних машин, що були розраховані на основі фізичних принципів, а не лише бібліотечних узагальнень.

У ANSYS Twin Builder було реалізовано:

- Модель прямого пуску асинхронного двигуна, що продемонструвала пусковий струм із значенням $I_{\text{ном}}/I_{\text{ном}}$, яке співвідноситься з реальними режимами пуску;

- Скалярну систему регулювання швидкості асинхронного двигуна, яка забезпечила стабільне співвідношення $U/f/U/f$ для збереження магнітного потоку. Похибка підтримання швидкості не перевищувала 2% у діапазоні частот від 10 до 50 Гц;

- Векторну систему керування асинхронним двигуном, яка показала високі динамічні характеристики з часом стабілізації швидкості менш ніж 0.3 секунди після зміни навантаження на 20%;

Модель регулювання швидкості BLDC-двигуна (для приводу шибера), яка забезпечила точність позиціювання кута шибера з похибкою не більше 1° та динамічний відгук із часом встановлення менше 0.1 секунди.

Окрім моделювання електроприводів, було проведено CFD-моделювання газового пальника в ANSYS Fluent. У результаті вдалося визначити розподіл температур у зоні горіння, структуру потоку повітря та газу, а також спрогнозувати утворення продуктів згоряння (NO_x , CO).

Найвища температура полум'я досягала 1600°C , а рівень викидів NO_x залишався нижчим за 30 ppm при оптимальному співвідношенні паливо/повітря 1:1.1.

Реалізовано інтеграцію моделей ANSYS Fluent і ANSYS Twin Builder для аналізу взаємодії газодинамічних процесів із системою автоматизації. Зокрема, результати ANSYS Fluent про змінний тиск і витрати повітря використовувались для корекції моделей приводів вентиляторів і шибера, що дозволило виявити ефекти зміни навантаження на двигуни в реальних експлуатаційних умовах.

Розроблено підхід до інтелектуалізації системи керування сушильним агрегатом шляхом інтеграції генетичного алгоритму в структуру цифрового двійника. Запропонований алгоритм забезпечує багатокритеріальний пошук раціональних режимів роботи з урахуванням поточного стану технологічного процесу та обмежень обладнання. За результатами імітаційного моделювання підтверджено його здатність до адаптивного коригування параметрів, стійкої збіжності та формування енергоефективних режимів роботи, що підтверджує практичну реалізацію інтелектуальної системи керування сушильним агрегатом.

За результатами проведеної перевірки встановлено, що розроблені математичні та імітаційні моделі адекватно відтворюють основні газодинамічні, теплові та електромеханічні процеси, які відбуваються у сушильному агрегаті. Середня відносна похибка між результатами моделювання та контрольними значеннями не перевищує 5 %, що відповідає вимогам до інженерних досліджень такого класу. Отриманий рівень точності дозволяє використовувати створені моделі для подальшої реалізації генетичного алгоритму оптимізації, дослідження режимів роботи сушильного агрегату та формування керуючих впливів в інтелектуальній системі керування технологічним процесом сушіння.

Результати третього розділу забезпечують комплексний інструмент для аналізу та оптимізації систем автоматизації газових пальників, поєднуючи високоточні моделі фізичних процесів із сучасними методами регулювання.

РОЗДІЛ 4

РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ГАЗОВИМ ПАЛЬНИКОМ

4.1 Конструкція та експлуатація газового пальника

Газовий блоковий пальник ГБГ-0,34 призначений для спалювання природного газу в топках агрегатів із дотриманням екологічних норм. Його номінальна теплова потужність становить 0,34 МВт, що відповідає витраті газу до 36,5 м³/год [9].

Принцип роботи газового пальника ГБГ-0,34 полягає у забезпеченні ефективного та безпечного процесу спалювання природного газу для отримання теплової енергії [10-12]. Робота пальника починається з подачі повітря, яке нагнітається вентилятором до головки пальника, створюючи необхідний тиск і витрату для оптимального процесу горіння. Одночасно природний газ під тиском через систему клапанів і газову рампу спрямовується до головки пальника, де він змішується з поданим повітрям, утворюючи однорідну газоповітряну суміш.

Запалювання суміші здійснюється електричною іскрою, яка генерується трансформатором запалювання через запалювальний електрод. Після запалювання в топці теплотехнічної установки утворюється стабільний полум'яний факел, у якому відбувається процес горіння палива з виділенням теплової енергії [13]. Пальник підтримує двоступеневе регулювання потужності, що дозволяє адаптувати його роботу до поточних потреб технологічного процесу.

Для забезпечення безпеки блок автоматики контролює герметичність газових клапанів перед запуском пальника та здійснює вентиляцію топки для видалення залишкових газів [15-16]. У разі відхилення параметрів роботи пальника від встановлених норм, наприклад, при зникненні полум'я або порушенні співвідношення паливо/повітря, система автоматично припиняє подачу газу та вимикає пальник. Такий підхід забезпечує ефективність, надійність та безпеку роботи пальника у різних умовах експлуатації [73, 74].

Пальник блочний газовий типу ГБГ-0,34, конструкція якого зображена у Додатку А, складається з наступних основних складальних одиниць:

- 1) вентилятор «1» – забезпечує примусову подачу повітря до головки пальника з необхідним тиском і витратою;
- 2) головка пальника «2» – встановлюється у місці змішування природного газу з повітрям та формування газоповітряної суміші;
- 3) Газова рампа «3» – контролює процеси запалювання, роботи та безпеки пальника, забезпечуючи автоматичний запуск і захисне вимкнення при недопустимих параметрах;
- 4) Блок автоматики «4» - для керування режимами роботи пальника та приєднання до контролера системи керування;
- 5) Кабелі та джгути комутації, які забезпечують електричне з'єднання між компонентами системи.

Позначення складових елементів наступне:

A1 – сервомотор шибера повітрязабірника;

A2 – блок керування;

A3 – пристрій контролю герметичності клапанів;

A4 – мультиблок рампи;

A5 – термостат;

BD1 – електрод контролю полум'я;

FV1 – електрод запалення;

KK1 – реле електротеплове струмове;

KM1 – пускач електродвигуна;

KM1.3, KM1.4 – приставка контактна;

KV1 – реле проміжне;

XT1 – набір затискачів;

FU1, FU2, FU3, FU4 – вставки плавкі;

M1 – електродвигун вентилятора;

SA1 – перемикач режимів роботи (МО – малий вогонь, БО – великий вогонь);

- SA2 – тумблер плавного регулювання;
 SP1 – датчик-реле зниження тиску повітря;
 SP2 – датчик-реле зниження тиску газу;
 SP3 – датчик-реле підвищення тиску газу;
 SP4 – датчик-реле контролю герметичності;
 TV1 – трансформатор запалення;
 XP1 – вилка роз'єму ШР 12;
 YA1 – електромагнітний клапан МО;
 YA2 – електромагнітний клапан БО;
 YA3 – запобіжний запірний електромагнітний клапан.

Функціональна схема пальника виконання з електромагнітними клапанами наведена на рис. 4.1. Схеми електричні принципи наведені у Додатку Б.

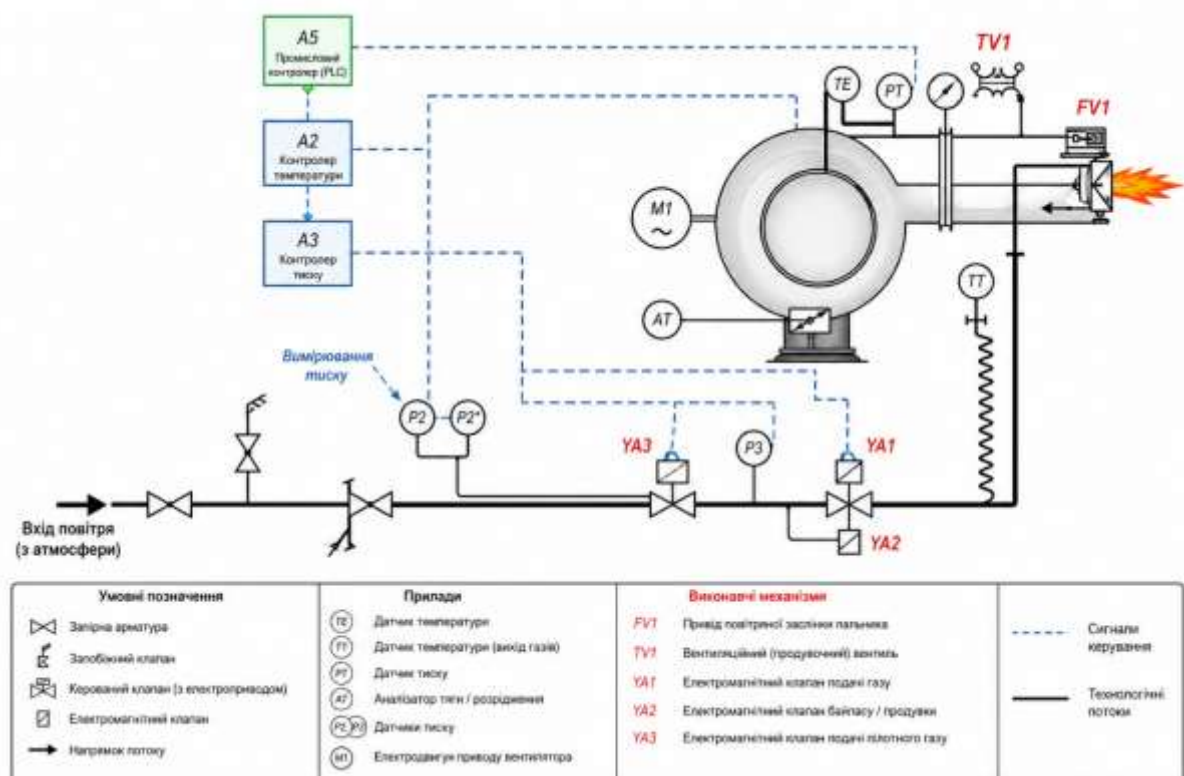


Рисунок 4.1 – Функціональна схема пальника ГБГ-0,34

Влаштування та робота пальника полягає у подачі повітря вентилятором в головку пальника з необхідним тиском і витратою. Одночасно природний газ під впливом тиску в газопроводі через клапани рампи також надходить до головки, де відбувається його змішування з повітрям. Запалювання газоповітряної суміші виконується електричною іскрою від трансформатора запалювання TV1 через електрод FV1.

При замиканні ланцюга керування SA1 відбувається запуск пальника. A3 автоматично проводить тест герметичності газових клапанів. При позитивному тесті включається вентилятор і A1 відкриває шибер в положення БО. Після закінчення вентиляції топки сервомотор A1 повертає шибер у положення МО.

Від SA1 виконується двоступінчасте регулювання теплової потужності МО-БО.

Робота складових частин газового пальника ГБГ-0,34 полягає у наступному:

1) Вентилятор 1, призначений для подачі повітря в головку пальника, складається з корпусу, колеса, укріпленого на валу електродвигуна M1, повітрязбірника з шибером A3 і сервомотора A1. Сервомотор має обмежувачі крайніх положень, проміжний вимикач та гвинт установки напрямку обертання.

2) Головка пальника 2, призначена для утворення газоповітряної суміші, запалення та стабілізації смолоскипа, складається з корпусу, розподільника 5, на якому укріплені електроди BD1, FV1 і стабілізатор 6, відбір тиску повітря 7, з'єднаний гнучкою трубою з трійником 8, від якого тиск за допомогою гнучких трубок передається на A4, SP1 і вимірювача тиску візуального контролю тиску повітря.

3) Рампа 3 призначена для подачі та регулювання витрати газу в розподільник та від вимкнення подачі газу при блокуванні пальника. На рампі розташований мультиблок A4, пристрій A3, датчики тиску SP2 і SP3 або клапани YA1, YA2, YA3 з датчиками тиску SP2, SP3 і SP4. Регулювання

витрати газу в режимі МО проводиться регулятором клапана YA2, регулювання витрати в режимі БО проводиться регулятором клапана YA1. Клапан YA1 у вихідній порожнині має штуцер з демпферним гвинтом 12 для підключення вимірювача тиску.

4) Блок автоматики 4 призначений для дистанційного керування пальником від зовнішніх дискретних сигналів, програмного розпалювання та блокування. Блок автоматики містить блок A2, пускач KM1 з електротепловим реле KK1 і контактною приставкою, перемикач SA1, реле KV1, вставки плавкі FU1, FU2, FU3, FU4 та вилку XP1. На передній панелі розташовані світлодіоди МЕРЕЖА, МО, БО, АВАРІЯ, ЗАГАЛЬ, ГАЗ, ПОВІТРЯ, кнопка скидання блокування. При натисканні кнопки блок A2 допускає розпалювання після незалежного від вимкнення пальника. Вхідні та вихідні сигнали блоку A2 приведені у Додатку В.

При подачі напруги на пальник з контакту 3 A2 через KM1.4 вона надходить на контакт 21 A2, з нього на A1, який повертає шибер в закрите положення.

Управління режимів роботи МО-БО пальника здійснюється дистанційно релейними сигналами від регулятора A5 у положенні SA1 «АВТ».

Вбудована помпа пристрою контролю герметичності клапанів VPS 504 підвищує тиск між клапанами мультиблоку на 2 кПа більше тиску перед мультиблоком. Після закінчення 26 с, за відсутності падіння тиску, пристрій дає сигнал на пуск пальника; якщо підвищення тиску не відбулося, пуск пальника блокується.

4.2 Апаратна реалізація системи керування

Основне завдання системи керування полягає у реалізації автоматичного керування газовим пальником ГБГ-0,34 сушильного барабану СБ-240, а саме асинхронним двигуном з короткозамкненим ротором вентилятора AIP71B4 та сервоприводом шибера повітрязбірника TM230.

Організація системи керування газовим пальником ГБГ-0,34 з електродвигуном вентилятора АІР71В4 можлива з використанням наступних пристроїв керування.

1) *Перетворювач частоти АТV930U07N4* – це засіб аналогової скалярної системи керування, в якому регулюється напруга й струм обмотки статора за модулем (рис. 4.2) [136]. В даному приладі реалізується перший закон частотного керування [128]:

$$\frac{U_1}{f_1} = const, \quad (4.1)$$

де U_1 – напруга обмотки статора;

f_1 – регульована частота напруги статора.



Рисунок 4.2 – Перетворювач частоти АТV930U07N4

На рис. 4.2 позначено:

1 – графічний дисплей , який відображає стан перетворювача частоти, коди помилок та значення параметрів;

2 – кнопки для переходу по вкладках сторінок дисплею;
 3 – кнопка переходу на домашню сторінку меню;
 4 – навігаційне сенсорне кільце, яке використовується для переміщення в меню, коригування значень параметрів і зміни швидкості двигуна в режимі локального керування.

Функціональна схема замкненої скалярної системи двозонного частотного електропривода, виконаної за двокальною системою підпорядкованого регулювання, що реалізовує закон скалярного керування, наведено на рис. 4.2. Схема електрична принципова мережі живлення наведена у Додатку Д, рис. Д.1. Схема підключення перетворювачів частоти приводів шибера, вентилятора та подавання палива наведені у Додатку Д, рис. Д.2 – Д.4.

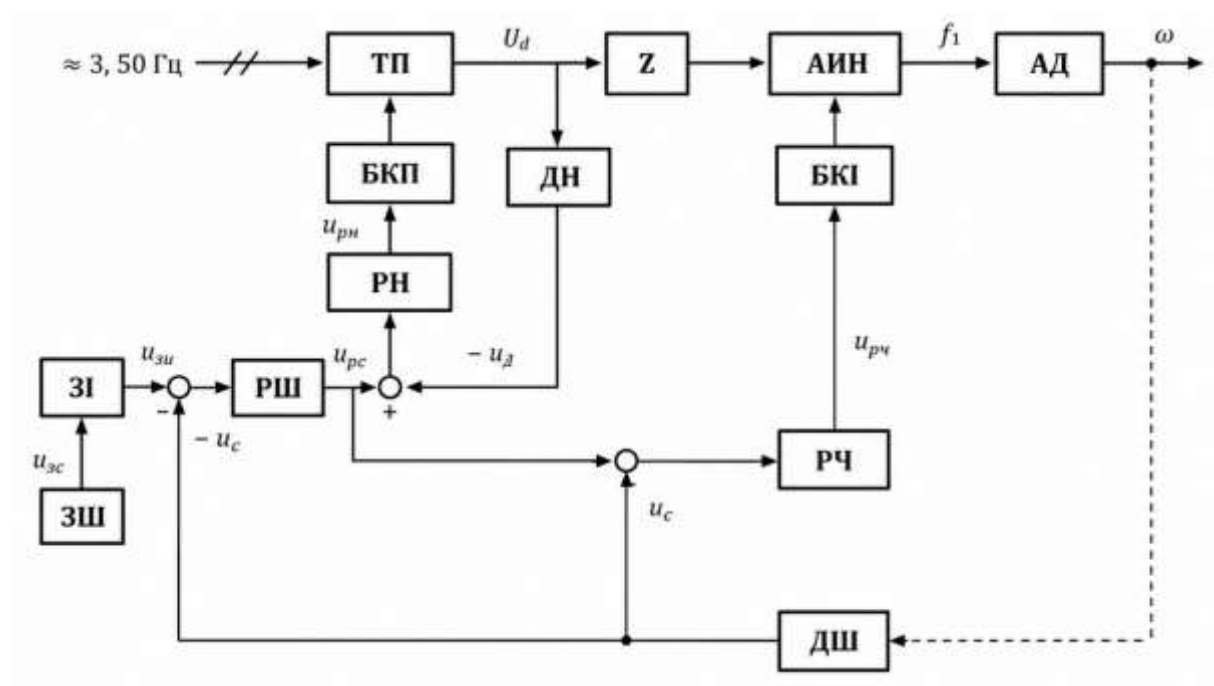


Рисунок 4.3 – Функціональна схема скалярної системи підлеглого двокального керування за законом $U/f = \text{const}$

На схемі рис. 4.3 позначено:

ЗШ – завдання швидкості;

ЗІ – завдання інтенсивності;

РШ – регулятор швидкості;

РЧ – регулятор частоти;

РН – регулятор напруги;

БКІ – блок керування інвертором;

БКП – блок керування тиристорним перетворювачем;

ДН – датчик напруги;

ДШ – датчик швидкості;

ТП – тиристорний перетворювач (ланка постійного струму);

Z – згладжу вальний фільтр;

АІН – автономний інвертор напруги;

АД – асинхронний двигун з короткозамкненим ротором.

Для стабілізації швидкості на валі двигуна на підсумовуючий вхід регулятора швидкості подається сигнал негативного зворотного зв'язку за швидкістю.

Інтенсивність розгону електропривода регулюється завданням інтенсивності ЗІ.

Зупинка електропривода виконується зняттям сигналу завдання швидкості на виході завдання швидкості ЗШ. При цьому частота напруги на виході автономного інвертора напруги АІН плавно знижується, а двигун АД переходить у режим рекуперативного гальмування. Реверс виконується зміною знаку сигналу завдання швидкості $u_{зш}$.

Логічна схема блоку керування інвертором змінює при цьому порядок чергування фаз на виході інвертора АІН за рахунок зміни первісної послідовності комутації ключів АІН.

Контроль швидкості й напруги здійснюється датчиком швидкості ДШ і датчиком напруги ДН. Керування роботою тиристорного перетворювача ТП здійснюється блоком керування БКП, а роботою АІН – блоком керування БКІ.

2) контролер *M241 TM241CE24T* – мікропроцесорний комплект цифрової системи керування (рис. 4.4), керуючі сигнали якого подаємо до частотного перетворювача для забезпечення можливості погодженої роботи

декількох механізмів газового пальника [61, 62]. Схема електрична принципова контролера та кола керування наведені у Додатку Д, рис. Д.5.

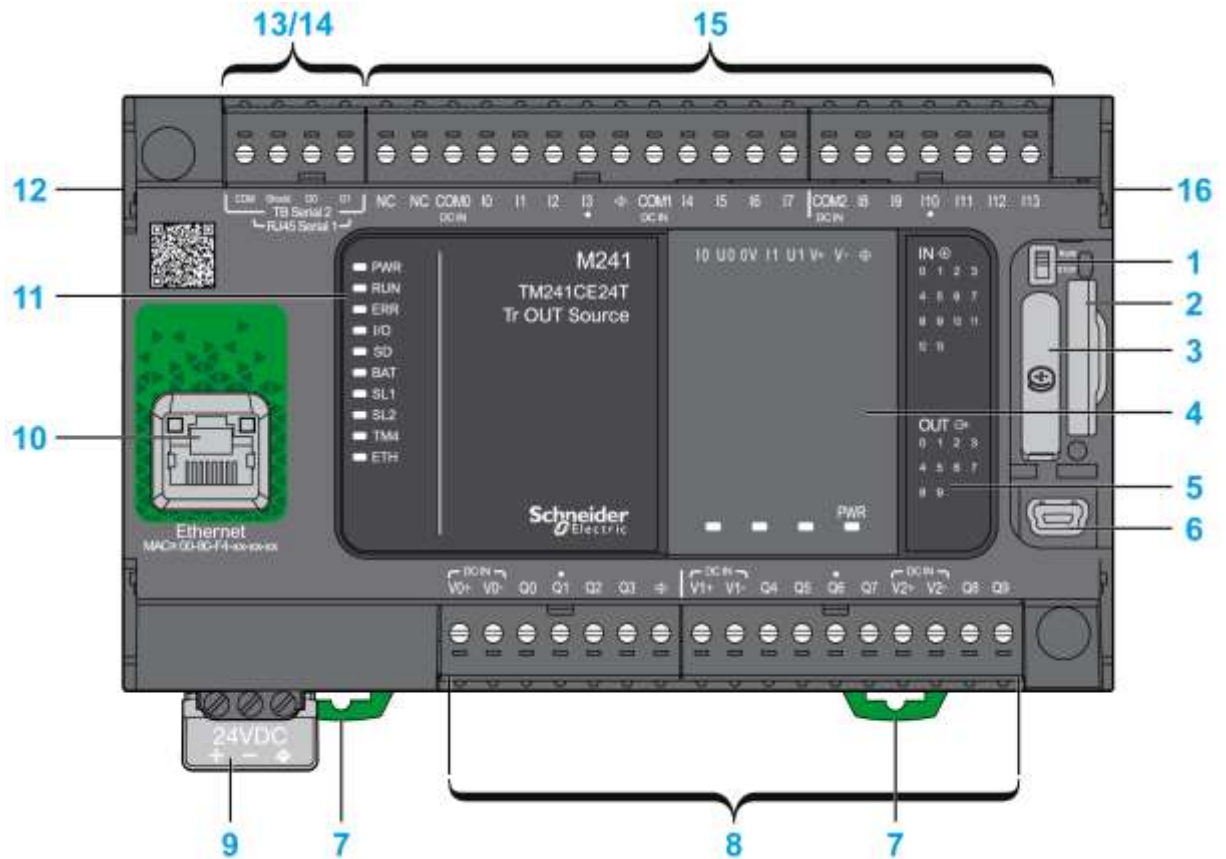


Рисунок 4.4 – Контролер M241 TM241CE24T

На рис. 4.4 позначено:

- 1 – перемикач «пуск/стоп», використовується для рестарту контролера при зміні програми, яка завантажується з ПК;
- 2 – роз'єм карти пам'яті;
- 3 – роз'єм для елемента живлення (для вбудованого годинника);
- 4 – роз'єм для картриджа;
- 5 – LED-дисплей для індикацій станів входних та вихідних портів;
- 6 – міні-USB порт для підключення до ПК (програма SoMachine);
- 7 – затискач для DIN-рейки 35 мм;
- 8 – транзисторні виходи;

- 9 – вхід мережі живлення постійного струму 24 В;
- 10 – вихідний Ethernet порт (роз'єм RJ45);
- 11 – LED-індикатор статусу контролера;
- 12 – роз'єм підключення шини розширення входів/виходів TM4;
- 13 – послідовний вхідний Ethernet порт (роз'єм RJ45);
- 14 – послідовний вхідний порт (RS-485);
- 15 – вхідні аналогові порти (для зовнішніх сигналів);
- 16 – слот підключення модуля розширення TM3/TM2.

До входу контролера 9 підводиться постійна напруга 24 В від джерела живлення DC1. Вхідний Ethernet порт контролера 13 підключений до сенсорної панелі Magelis HMISTU855 (рис. 4.5) [50].



Рисунок 4.5 – Сенсорна панель Magelis HMISTU855

Вихідний Ethernet порт 10 підключений до перетворювача частоти ATV930.

Підключення вхідних аналогових портів 15 контролера:

com – негативний полюс -24 В джерела живлення DC1;

I1 – контакт лівого кінцевого вимикача K1;

I2 – контакт правого кінцевого вимикача K2.

Схеми електричні принципові з реалізації системи керування режимами роботи газового пальника і на позначення яких міститься посилання у тексті цієї роботи, наведено у Додатку Д.

Алгоритми керування електроприводами, пов'язані з формуванням певних законів регулювання швидкостей, що забезпечують виконання технологічних операцій у заданій логічній послідовності [134].

Для об'єкта, який починає рухатися електроприводом, програмне керування описується функцією:

$$n_i = f(T_i), \quad (4.2)$$

де n_i – частота обертання валу електродвигуна (об/хв) на заданому інтервалі часу T_i , с;

i – номер інтервалу часу з початку відліку, $i = 0, 1, 2 \dots m$.

Закон керування (4.2), який формується у мікропроцесорному комплекті керуючою програмою (МПК), записаною в чарунках постійного запам'ятовуючого пристрою (ПЗП) за певними адресами, ілюструється графіком $n = f(t)$ (рис. 4.6) і алгоритмом керування (рис. 4.7).

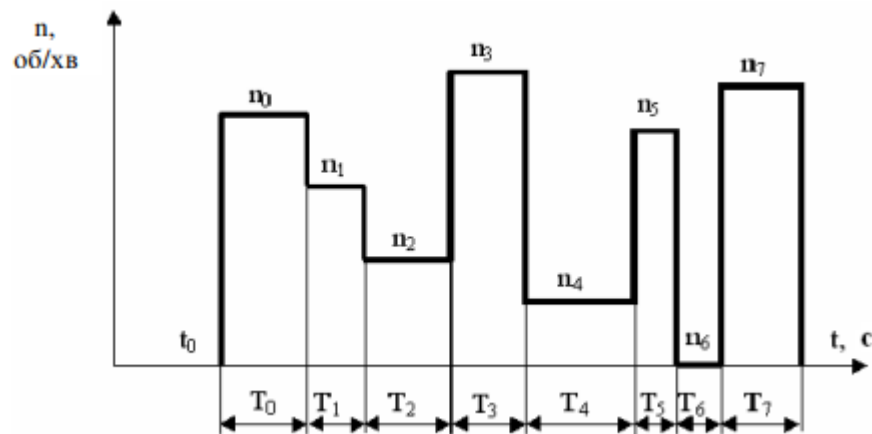


Рисунок 4.6 – Діаграма роботи електропривода

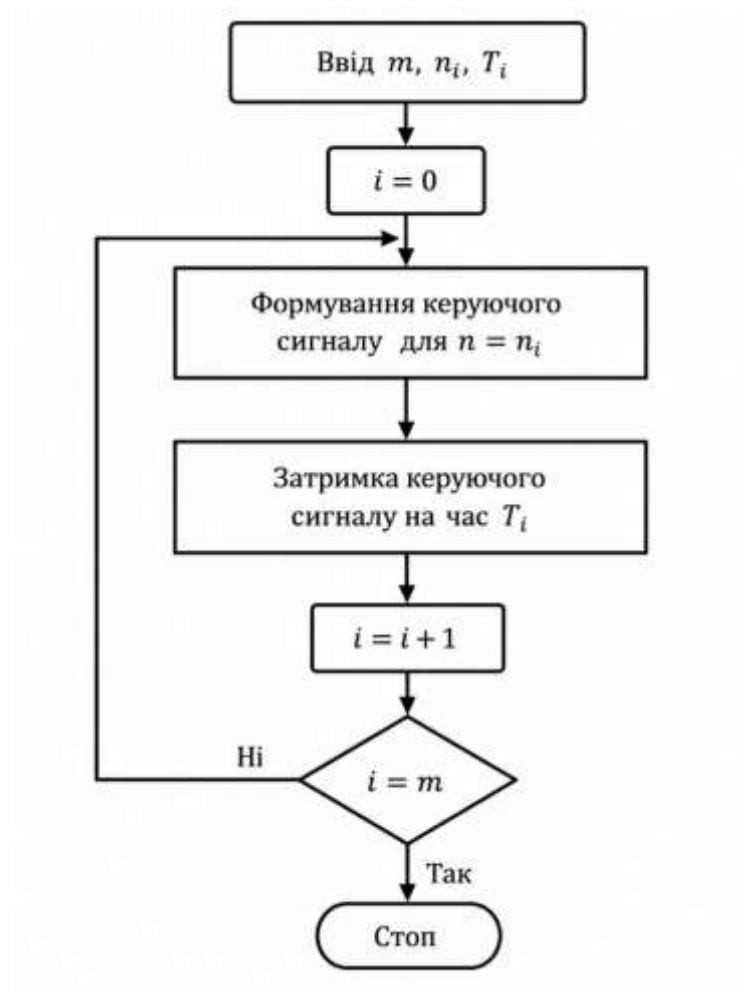


Рисунок 4.7 – Алгоритм керування електроприводом

Функціональна схема системи програмного керування тиристорним електроприводом наведена на рисунку 4.8.

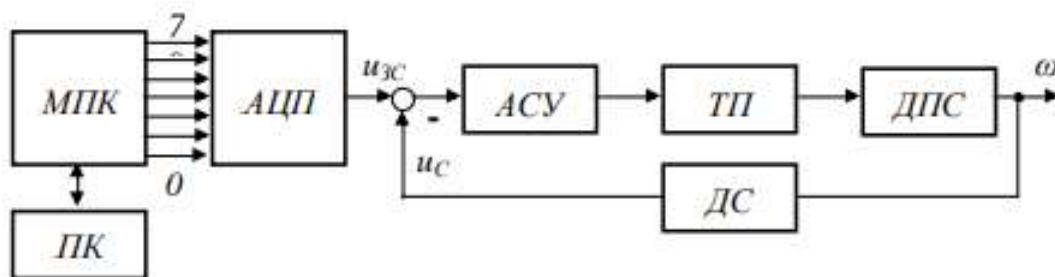


Рисунок 4.8 – Функціональна схема системи програмного керування тиристорним електроприводом

Програма керування заноситься у пам'ять МПК із пульта керування ПК або за допомогою перепрограмувального постійного запам'ятовуючого пристрою (ППЗП). За командою з пульта керування МПК звертається до записаної програми й зчитує її команди, формує цифровий код, передає його на зовнішній порт, далі цей код за допомогою восьмибітового аналого-цифрового перетворювача АЦП перетвориться в необхідний аналоговий сигнал завдання швидкості $u_{зш}$, і система аналогового керування включає привід, і він починає працювати за програмою.

З) *сенсорна панель Magelis HMISTU855* для реалізації людино-машинного інтерфейсу (див. рис. 4.5).

Приведені пристрої виробництва ТОВ «Шнейдер Електрик Україна» дозволяють реалізувати гібридну систему керування, де наявна цифрова і аналогова складова.

4.3 Реалізація системи керування в SoMachine Logic Builder

Програма SoMachine Logic Builder призначена для конфігурації і програмування обладнання виробництва Schneider Electric, такого як контролери, перетворювачі частоти, панелі людино-машинного інтерфейсу та інші модулі [137, 138]. Налаштовані в SoMachine проєкти дозволяють виконувати діагностику та обслуговування електроприводів [139]. Окрім того, проєкти SoMachine дозволяють проводити так званий «холодний тест»

системи керування, що наближає розробку до реальної реалізації. Якщо симуляція в SoMachine проходить без помилок і попереджень, його можна завантажувати в контролер і відразу використовувати. Також SoMachine має функцію гібридного тесту, коли частина обладнання, наприклад перетворювачі частоти, є справжніми, а сам контролер та/або сенсорна панель віртуальні.

Нижче наведено опис з розробки проєкта системи керування електроприводами газового пальника в цій програмі.

У SoMachine створюється новий проєкт, головна сторінка, яка відображена на рис. 4.9 та сторінка налаштування параметрів приводу.

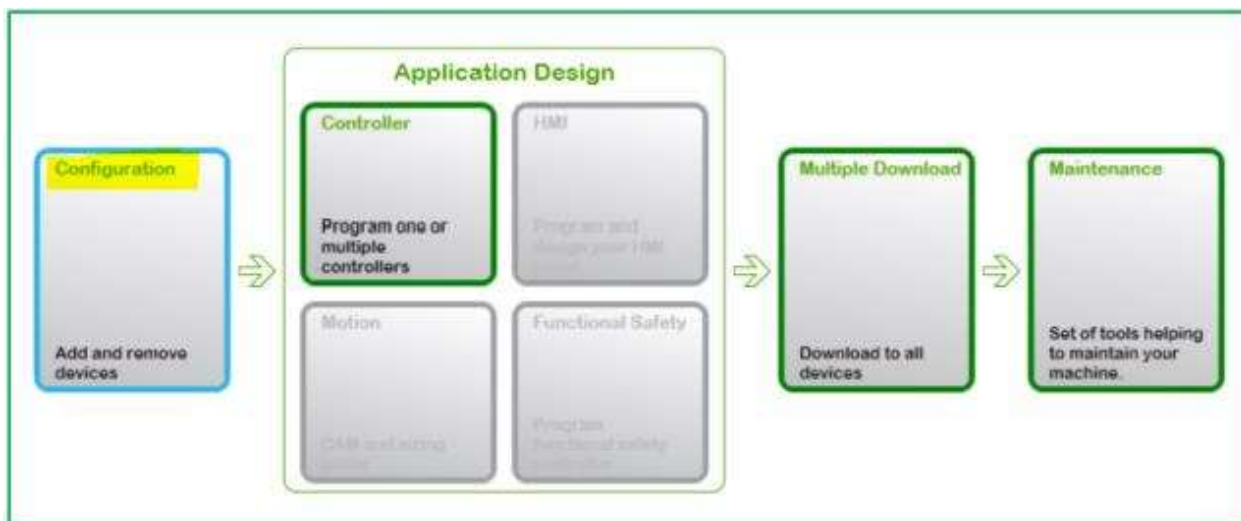


Рисунок 4.9 – Головна сторінка проєкту у SoMachine

Додаються необхідні пристрої, а саме логічний контролер M241CE24T/U. Відкривається “Configuration” [Add and remove device] та у вікні із заголовком “Please select your device” у переліку пристроїв розгортається список “M241”, обирається контролер “M241CE24T/U”.

Потім розгортається список “Magelis HMI & iPC”, в ньому відкривається список “HMISTU Series”, де обирається сенсорна панель “HMISTU855”.

У головному вікні проєкту в центральній секції “Application Design” відкривається “Controller”. При цьому відкриється вікно програми (рис. 4.10), в якому буде виконуватись подальша робота з налаштування проєкту.

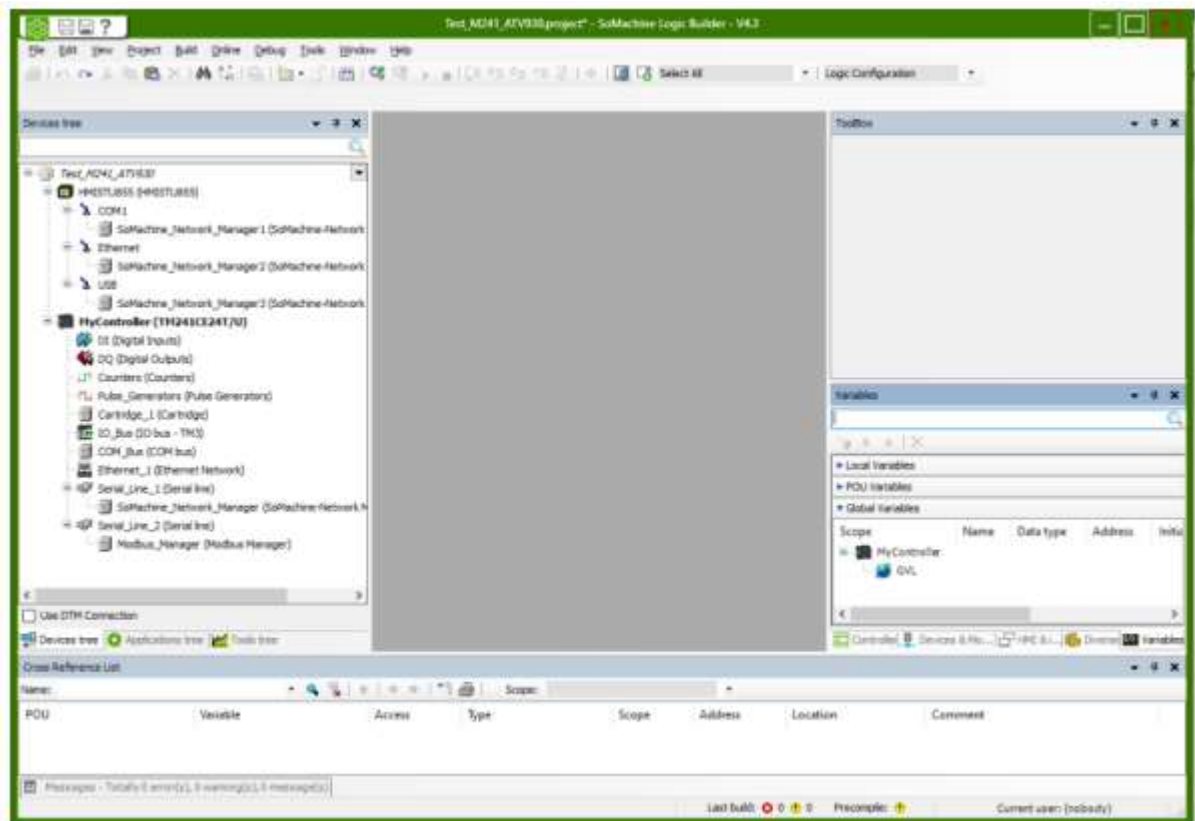


Рисунок 4.10 – Вікно конфігурації проєкту в SoMachine Logic Builder

У головному вікні проєкту в центральній секції “Application Design” відкривається “Controller”. При цьому відкриється вікно програми (див. рис. 4.10), в якому буде виконуватись подальша робота з налаштування проєкту.

Об’єкти вкладки “Device tree”:

- 1) DI (Digital Inputs) – підключення вхідних портів контролера;
- 2) DQ (Digital Outputs) – підключення вихідних портів контролера;
- 3) Ethernet_1 (Ethernet Network) – додавання перетворювача частоти за протоколом Ethernet TCP/IP

Об’єкти вкладки “Application tree”:

- 1) Application – головний розділ проєкту програми;
- 2) GVL – розділ глобальних змінних проєкту;
- 3) MAST – розділ підключення головної програми.

Перетворювач частоти ATV930 підключений до контролера за допомогою зв'язку Ethernet. Тому в проєкті SoMachine треба додати засіб для реалізації такого виду зв'язку. На вкладці “Devices tree”, у вікні, що з'явилося, потрібно розгорнути рядок із заголовком “ProtocolManagers”, обрати рядок “Industrial Ethernet Manager” та натиснути кнопку “Add device”. На вкладці “Device tree” у секції “Ethernet_1 (Ethernet Network)” з'явиться новий рядок “Industrial_Ethernet_Manager”.

SoMachine додає перетворювач частоти у проєкт (з використанням шаблону) супроводжується автоматичною генерацією програми для його контролю. Тому насамперед треба створити пустий бланк програми, в полі якої буде розміщатись головна програма керування ПЧ. Для цього треба перейти на вкладку “Application tree”, натиснути ПКМ на рядку “Application” та у контекстному меню послідовно обрати пункти “Add object”, “POU...”.

Налаштовується вікно та у списку вкладки “Devices tree” з'явиться об'єкт “POU_Start (PRG)”, перетягуємо до рядка із назвою “MAST” у секції “Task Configuration”.

В результаті такої операції програма буде запускатись відразу після подавання живлення на контролер.

Додається перетворювач частоти у проєкт, перемкнувшись на вкладку “Devices tree”, на рядку “Industrial Ethernet Manager” у контекстному меню обирається пункт “Add device from template”.

У полі вікна “Device Name” вводиться ім'я ПЧ “ATV930”. У новому вікні розгортається рядок “Altivar Device Templates”, обирається у списку “Altivar 9xx EtherNet/IP”. У полі “Device Address” задається IP адреса ПЧ: 192.168.210.45.

В результаті виконаної операції у пристрої “Industrial_Ethernet_Manager” з’явиться об’єкт “ATV930 (Altivar 9xx)”, а у програмі “POU_Main” буде створено структурну схему перетворювача частоти (рис. 4.11).

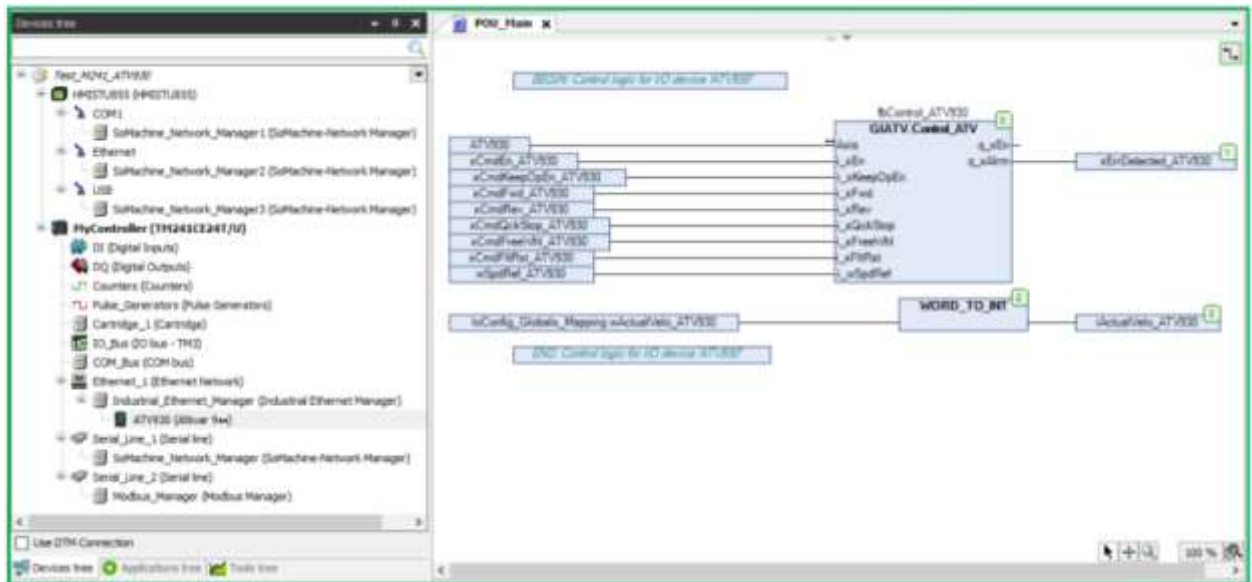


Рисунок 4.11 – Вікно програми після додавання перетворювача частоти

Блок “GIATV.Comtrol_ATV” містить такі параметри, які будуть задіяні в проєкті:

i_xEn – біт активації ПЧ;

i_xFwd – команда руху «вперед»;

i_xRev – команда «реверс»

i_wSpdRef – цільова швидкість обертання двигуна, об/хв.

На даному етапі перетворювач частоти у проєкті не прив’язаний до конкретної моделі та не має налаштувань Ethernet-зв’язку з контролером.

Для ініціалізації ПЧ на вкладці “Devices tree” обираємо “Start offline” та вказуємо модель “ATV930U07N4”. У вікні конфігурації на вкладці “My Dashboard” в розділі “Settings” встановлюються параметри ПЧ (рис. 4.12).

Останній етап налаштування підключеного пристрою полягає у встановленні параметрів протоколу Ethernet/IP контролера. На вкладці

“Devices tree” відкривається рядок “Industrial_Ethernet_Manager” та у вікні параметрів мережі, натиснувши на гіпер-посилання “Ethernet_1”, відкривається вікно, в яке вносяться зміни. Параметри мережі після коригування, відображені на рис. 4.13.

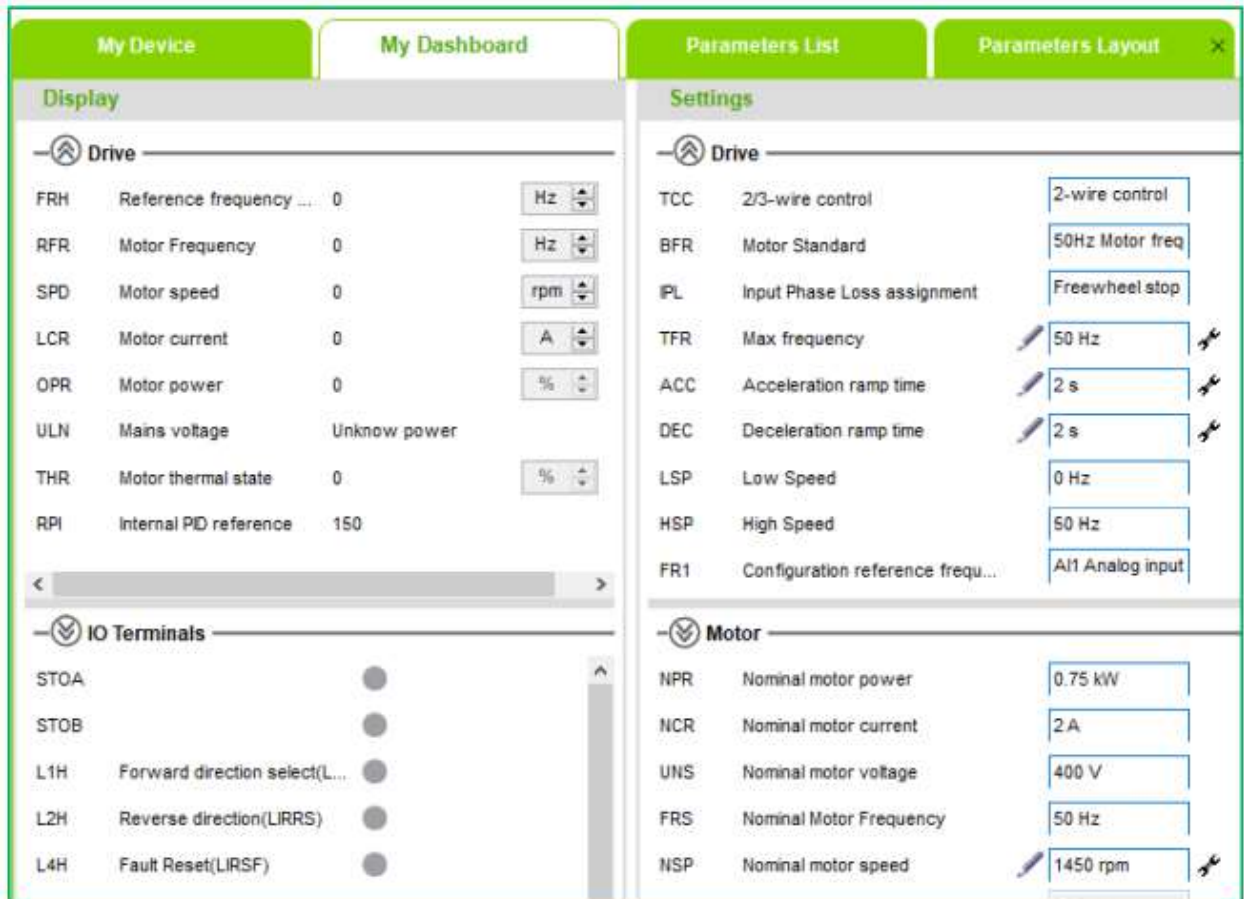


Рисунок 4.12 – Сторінка конфігурації перетворювача частоти

Industrial_Ethernet_Manager X										
Scanner settings Network Manager Scanner Resources I/O Scanner I/O Mapping EtherNet/IP Scanner I/O Mapping Status Information										
DHCP client										
	Device Name	IP Address	MAC Address	DHCP Device Name	Subnet Mask	Gateway Address	Identified by	Device Type	Protocol	
0	Ethernet_1	192.168.210.44	88-88-88-88-88-88		255.255.255.0	192.168.210.44	Fixed	Ethernet Network	EtherNet/IP	
1	ATV930	192.168.210.45	88-88-88-88-88-88	ATV930_1	255.255.255.0	192.168.210.44	Fixed	Atmel 9xx	EtherNet/IP	

Рисунок 4.13 – Вікно налаштованих параметрів мережі

Команди і сигнали, як логічні змінні або числа, для автоматизованого керування технологічними процесами повинні бути одночасно доступними

для всіх пристроїв системи керування, тобто знаходитись в глобальному просторі даних або у глобальному сховищі.

В проєкті виникає наступний обмін даними:

1. двобічний обмін між сенсорною панеллю і контролером (оператор через панель подає команди або змінює параметри приводу, контролер виводить на панель поточні значення параметрів);
2. двобічний обмін між контролером та перетворювачем частоти ATV930 (контролер подає команди ПЧ та приймає змінні стану ПЧ);
3. однобічний обмін між кінцевими вимикачами та контролером (кінцевий вимикач активує чи деактивує входні порти контролера).

Для зберігання інформації наведених команд та параметрів системи в проєкті створюємо глобальні змінні, наведені в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Глобальні змінні проєкту

№ п/п	Ім'я змінної	Тип	Призначення
1	<i>xStart</i>	BOOL	Активація приводу вентилятора
2	<i>xStop</i>	BOOL	Активація приводу шибера повітрозабірника
3	<i>xReverse</i>	BOOL	Активація приводу сушильного барабану
4	<i>xRight</i>	BOOL	Рух шибера вправо на закриття
5	<i>xLeft</i>	BOOL	Рух шибера вліво на закриття
6	<i>xLimitRight</i>	BOOL	Спрацьовування правого кінцевого вимикача
7	<i>xLimitLeft</i>	BOOL	Спрацьовування лівого кінцевого вимикача
8	<i>xSpeed1</i>	WORD	Цільова швидкість обертання, об/хв
9	<i>xStep1</i>	WORD	Крок зміни цільової швидкості, об/хв
10	<i>xAcc1</i>	INT	Час розбігу двигуна, с
11	<i>xDec1</i>	INT	Час гальмування двигуна, с

У проєкті на вкладці “Application tree” в вікні GVL (Global Variables) відкривається простір, в якому створюються та редагуються змінні. На рис.

4.14 показано представлення змінних, наведених в табл. 4.1, у програмному вигляді.

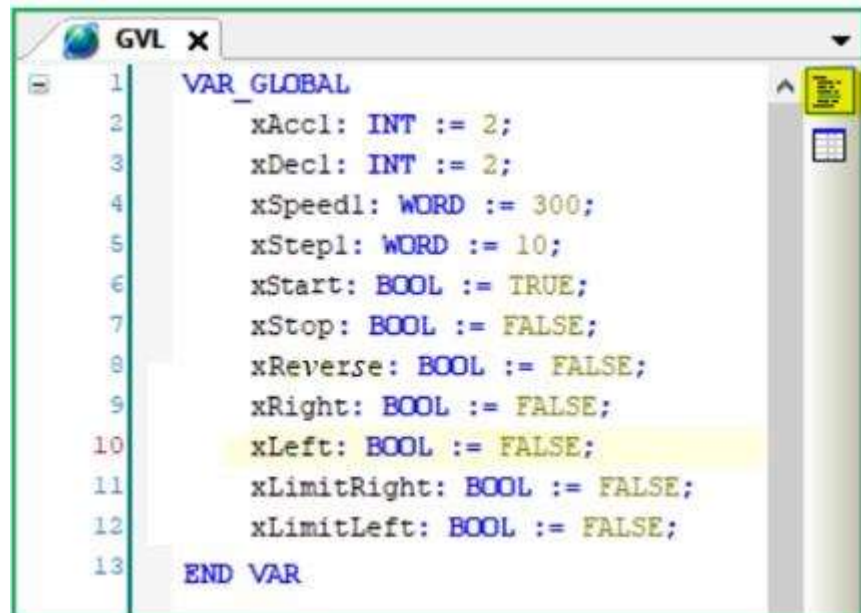


Рисунок 4.14 – Вікно проєкту із переліком глобальних змінних

На цьому робота із змінними проєкту повністю завершена.

Необхідність передати на один вхід блоку програми декілька сигналів забезпечується використанням елемента «структура».

Дані структури передаються за її ім'ям, а доступ до змінних, які входять до цієї структури, надається через оператор «крапка», який ставиться після імені структури.

В проєкті створено структуру “*strLimits*”, яка містить логічні змінні стану кінцевого вимикача *lim* та команди на рух *cmd*;

Розроблюємо програму блокування руху. В проєкті вже існує програма керування рухом електроприводу “POU_Start” і її можливостей достатньо для виконання базових операцій.

Для додаткового контролю руху створюється окремий програмний модуль “POU_LIMIT” (рис. 4.15), алгоритм роботи якої можна описати таким чином:

1. При спрацьовуванні кінцевого вимикача блокувати рух електричного

приводу у напрямку саме цього вимикача;

2. При розімкненому положенні кінцевого вимикача дозволяти рух електричного привода.

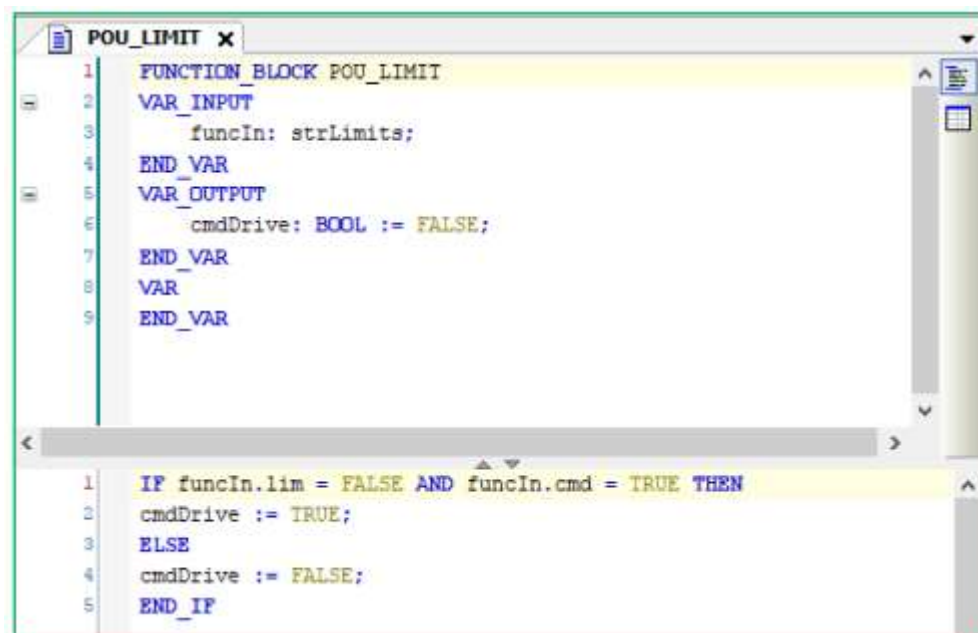


Рисунок 4.15 – програма обмеження руху приводу

Як видно з лістингу, входною змінною програми у секції VAR_INPUT є структура типу *strLimits* з ім'ям *funcIn*. Вихідним параметром у секції VAR_OUTPUT є логічна змінна з ім'ям “*cmdDrive*”.

У коді програми доступ до значень структури відбувається через оператор «крапка»: *funcIn.lim*, *funcIn.cmd*.

Етап розробки програми керування електричним приводом завершується розширенням головного програмного модуля “POU_Start” раніше створеною програмою користувача “POU_LIMIT” та додаткового блоку Ramp із завдання часу розгону та гальмування привода.

В програмі “POU_Start” на вкладці “Application tree” видаляються непотрібні входні блоки “xCmdFwd_ATV930”, “xCmdRev_ATV930”, “wSpdRef_ATV930”.

Вікно головного меню після видалення непотрібних блоків матиме вигляд, приведений на рис. 4.16.

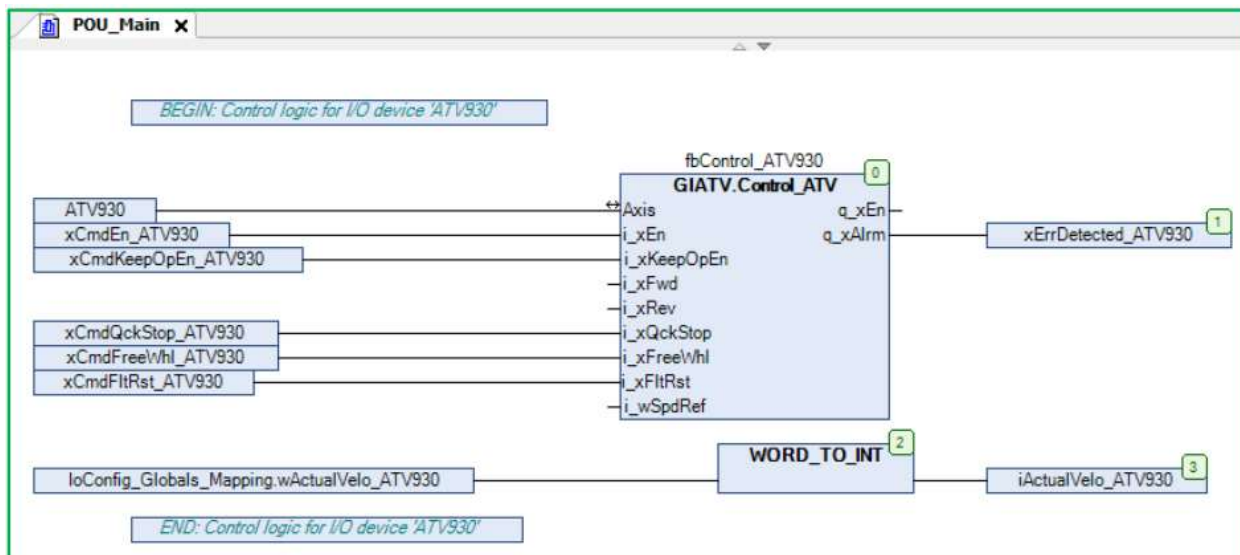


Рисунок 4.16 – Вікно головної програми після видалення вхідних блоків

Далі з правої панелі інструментів ToolBox перетягується елемент “Composer” у вільне поле програми. У вікні Input Assistan розгортається рядок “Application”, в ньому обирається структура *strLimits*. При цьому елемент “Composer” змінить свій вигляд.

Перетягуються у поле програми з панелі Toolbox два елементи “Input” та з’єднуються з входами *lim* і *cmd* структури.

У вікні Input Assistant розгортається рядок “Application”, потім рядок “GVL” і обирається змінна *xLimitRight*. Аналогічним чином в вікні Input Assistant для другого блоку Input, який з’єднаний зі входом *cmd* структури. У вікні Input Assistant обирається змінна *xCmdFwd_ATV930*.

Після виконаних операцій одержана композиція двох блоків (рис. 4.17).

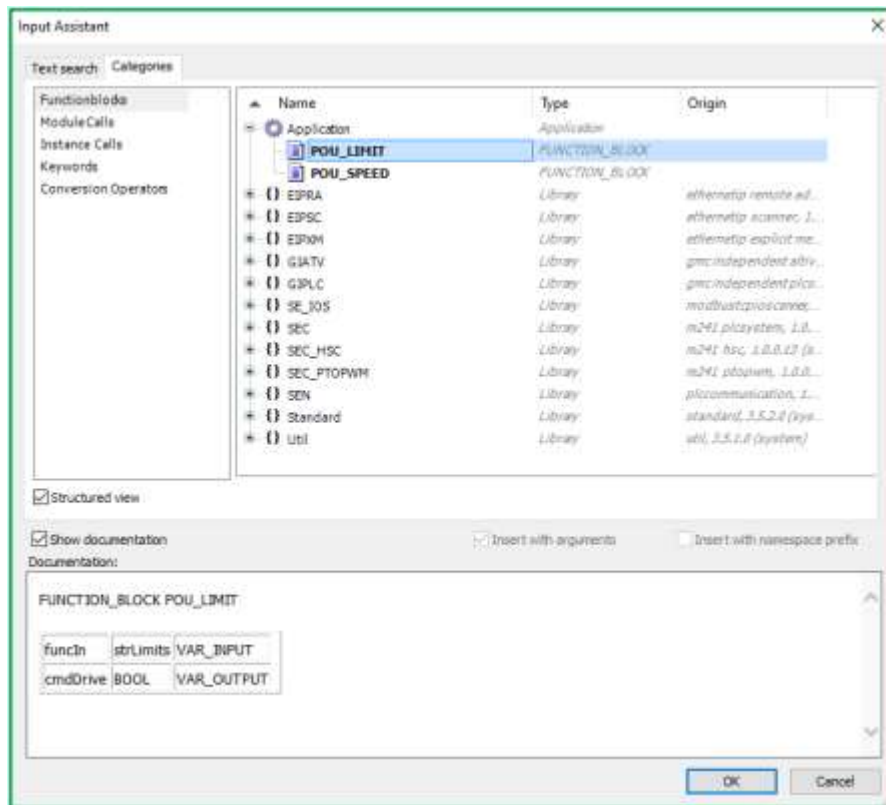


Рисунок 4.17 – Асоціація програми POU_LIMIT з елементом Box

У вікні створення глобального доступу для програми задається ім'я програми POU_LIMIT_R. З'єднується вихід структури зі входом *funcIn* блоку програми, а вихід *cmdDrive* програми зі входом *i_xFwd* головного блоку перетворювача частоти GIATV.Control_ATV. Аналогічним чином підключаються до входу *i_xRev* програми POU_LIMIT_L та структура *strLimits* зі змінними *xLimitLeft* й *xCmdRev_ATV930* (рис. 4.18).

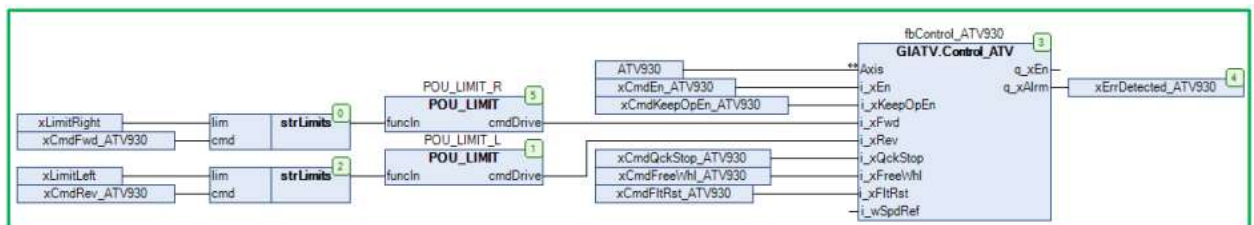


Рисунок 4.18 – Підключення двох програм до блоку перетворювача частоти

Створюється програма завдання часу розгону і гальмування приводу, перетягнувши у вільне поле елемент Box, обирається функція *SetDriveRamp_ATV* (рис. 4.19). Змінюється код опису локальних змінних програми (рис. 4.20).

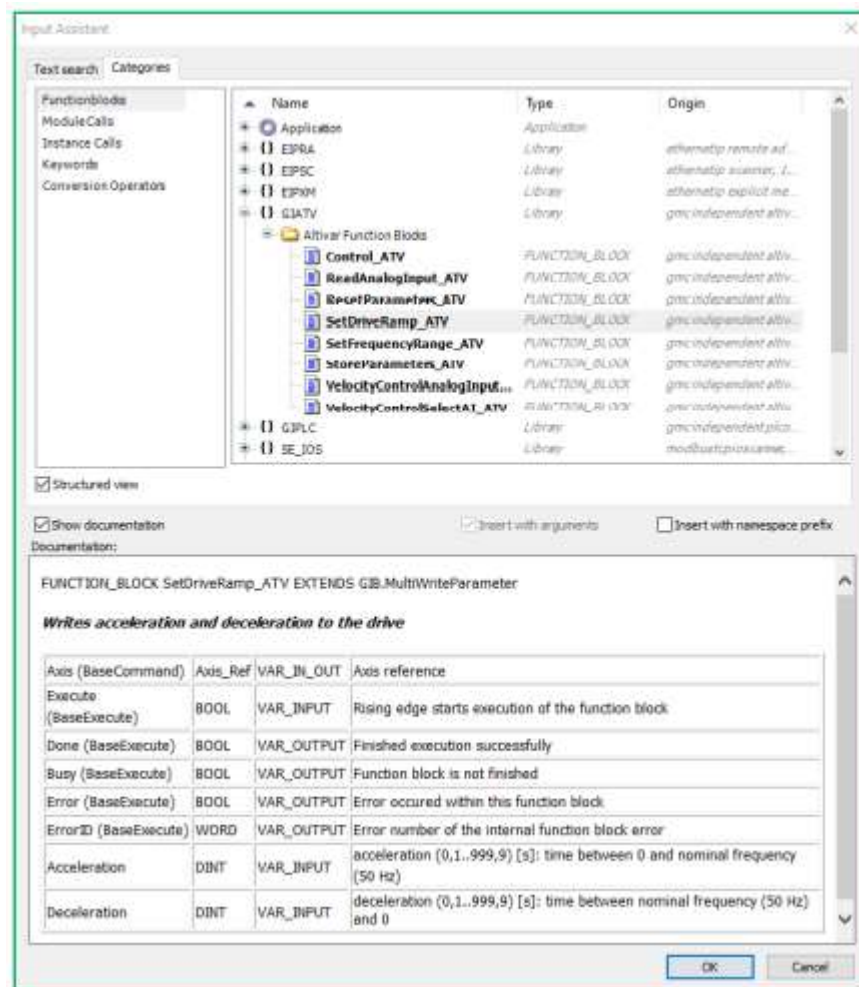


Рисунок 4.19 – Вибір функції контролю інтенсивності розбігу та гальмування

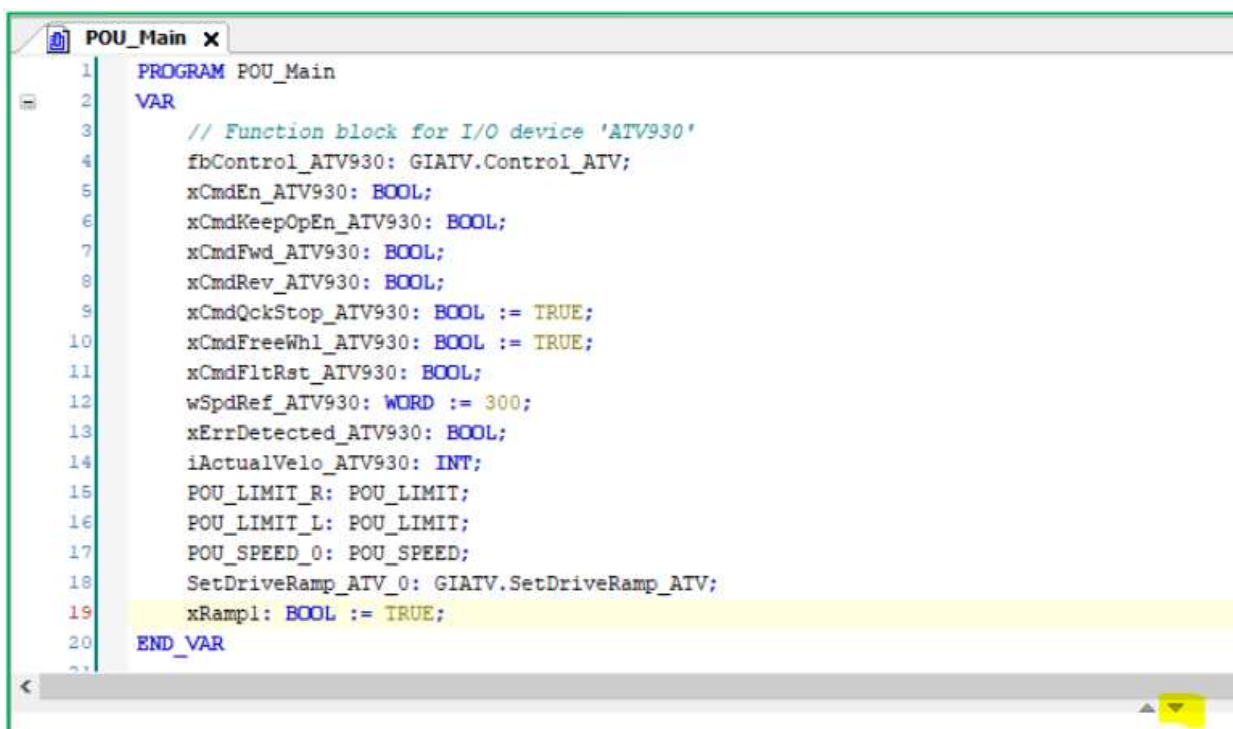


Рисунок 4.20 – Код програми з описом локальних змінних

В наведеному кодї найважливіші змінні наступні:

1. *xCmdQckStop_ATV930* – команда, яка дозволяє контролюване гальмування приводу;
2. *xCmdFreeWhl_ATV930* – команда, яка дозволяє виконувати вільний вибіг двигуна при гальмуванні;
3. *wSpdRef_ATV930* – початкове значення швидкості обертання при активації перетворювача частоти, об/хв;
4. *xRamp1* – команда, яка дає дозвіл на зміну часу розбігу та гальмування.

Додаються у поле програми чотири елементи Input та з'єднуються із входами Axis, Execute, Acceleration та Deceleration блоку SetDriveRamp_ATV. Для блоків Input, з'єднаних з портами Execute, Acceleration та Deceleration, призначаються глобальні змінні *xRamp1*, *xAcc1*, *xDec1* відповідно.

Для блоку Input, з'єданого з портом Axis, замість трьох знаків питання всередині блоку Input задається позначення “ATV”.

У фінальному вигляді структура програми керування перетворювачем представлена на рис. 4.21.

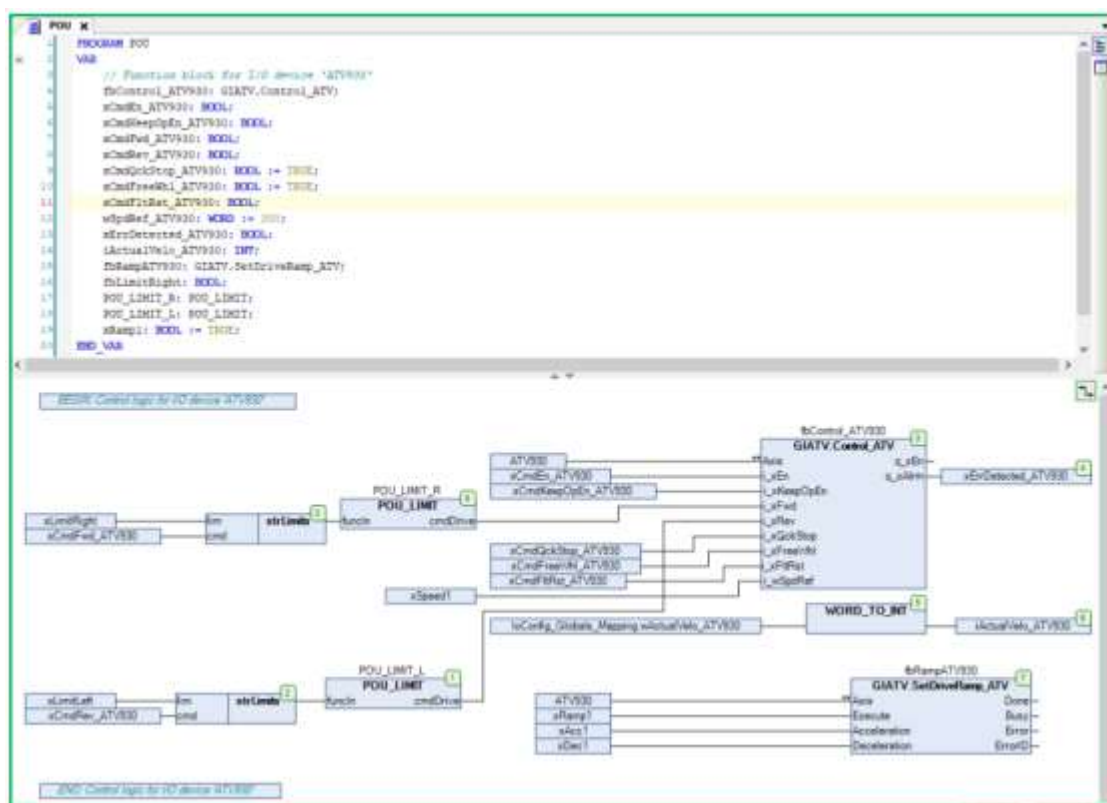


Рисунок 4.21 – Програма керування перетворювачем частоти ATV930

Налаштовуються вхідні та вихідні порти у відповідності до схеми підключення контролера, який окрім обміну даними в цифровому форматі з перетворювачем частоти через Ethernet зв'язок здатен як перетворювати вхідні аналогові сигнали на логічні біти стану портів, так і подавати на аналогові виходи напругу в залежності від стану внутрішніх логічних змінних.

Для налаштування вхідних портів контролера в проєкті на вкладці “Devices tree” у вікні на рядку “DI (Digital Inputs)” розгортається рядок “Inputs”, потім “iwDI_IW)” та обирається “Reset mapping” для скидання призначень портів, згенерованих автоматично при створенні проєкту та аналогічно виконується налаштування вихідних портів, відкриваючи рядок “DQ (Digital Outputs)”.

На цьому налаштування контролера M241 повністю завершено.

4.4 Система диспетчерського керування в Vijeo Designer

Проект людино-машинного інтерфейсу системи диспетчерського керування роботою приводами газового пальника розробляється в окремій програмі Vijeo Designer виробництва Schneider Electric та передбачає вирішення таких завдань [140]:

- 1) Розробка графічного інтерфейсу для взаємодії з користувачем (оператором);
- 2) Зв'язок графічних елементів панелі зі змінними проекту SoMachine;
- 3) Встановлення зв'язку між проектом сенсорною панеллю та контролером.

Для синхронної розробки панелі і контролера та подальшої сумісної симуляції двох пристроїв, програма Vijeo Designer відкривається безпосередньо з SoMachine.

Встановлюється зв'язок між контролером та панеллю через програму SoMachine, копіюючи службове ім'я контролера у буфер обміну та у поле Equipment Address or Node Name.

Наступний крок полягає у розробці графічного інтерфейсу сенсорної панелі HMISTU855.

Створюються шаблони для панелей:

- 1) PanelStart – контроль приводу вентилятора;
- 2) PanelStop – контроль сервомотору шибера повітрязбірника;
- 3) PanelReverse – контроль приводу обертання сушильного барабану;
- 4) PanelOptions1 – параметри перетворювача частоти ATV930;
- 5) PanelOptions2 – параметри перетворювача частоти ATV930.

Сенсорна панель обмінюється даними (значеннями глобальних змінних) із контролером. Для забезпечення доступу до цих змінних передаємо їх з проекту SoMachine в проект Vijeo Designer.

Для цього у програмі SoMachine відкривається вкладка Tools tree. В контекстному меню рядка Application послідовно обираємо пункти “Add Object”, “Symbol configuration...”.

Виконується компіляція проєкту, натискаючи “Build” на панелі інструментів і у переліку доступних змінних виділяються GVL та POU_Start.

Далі експортуються обрані змінні у пункті “Export Symbols to VijeoDesigner”. Тепер обрані змінні доступні у проєкті сенсорної панелі в програмі Vijeo Designer.

Розробка сторінки приводу вентилятора. Відкривається форма та розміщується на формі надпис «Target speed». Обирається на панелі інструмент Numeric Display та виділяється прямокутник необхідних габаритів.

Для параметру Variable обираємо змінну xSpeed1, інші налаштування показані на рис. 4.22.

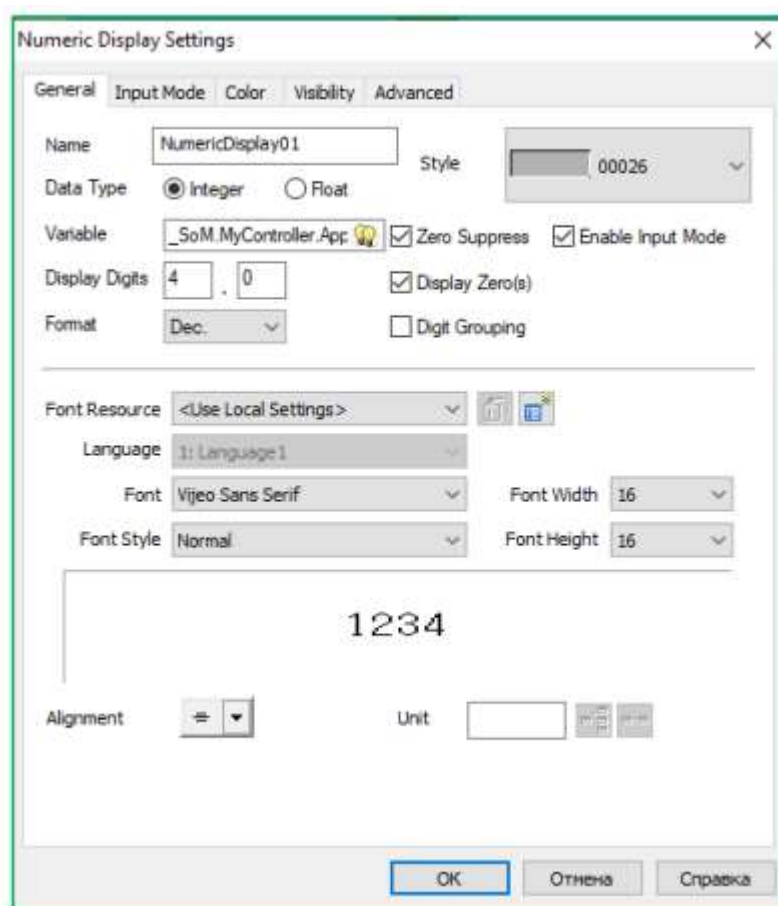


Рисунок 4.22 – Вкладка General налаштувань елементу Numeric Display

На вкладці Input Mode ставиться відмітка для параметру “Enable Input Mode” для забезпечення введення даних безпосередньо з сенсорної панелі.

Обирається на панелі інструментів інструмент Meter та виділяється на формі прямокутник. Для параметру Variable обирається змінна iActualVelo_ATV930, інші налаштування показі на рис. 4.23.

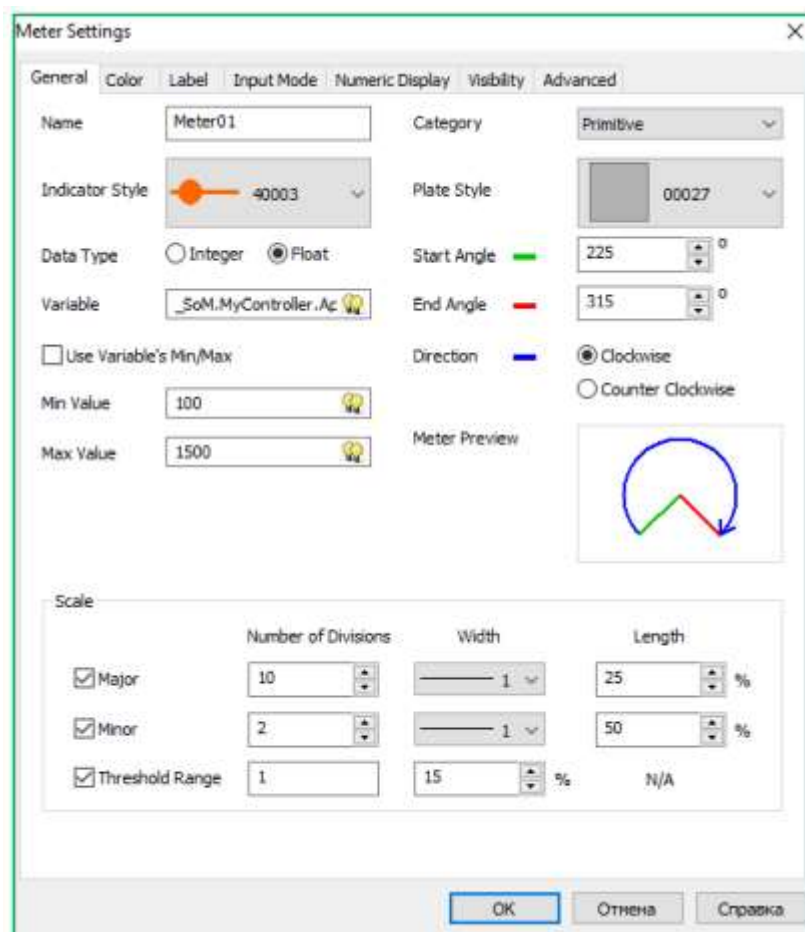


Рисунок 4.23 – Вкладка General налаштувань елементу Meter

На вкладці Numeric Display ставиться відмітка для параметра Enable Numeric Display. У полі Display Digits вказується число 5. Результат виконаних операцій показаний на рис. 4.24.

Створюється на формі елемент Horizontal Bar Graph. Для параметру Variable вказується змінна xSpeed1. На вкладці Input Mode вказується позначка “Enable Input Mode” та виконуються налаштування регулятора, як показано на рис. 4.25.

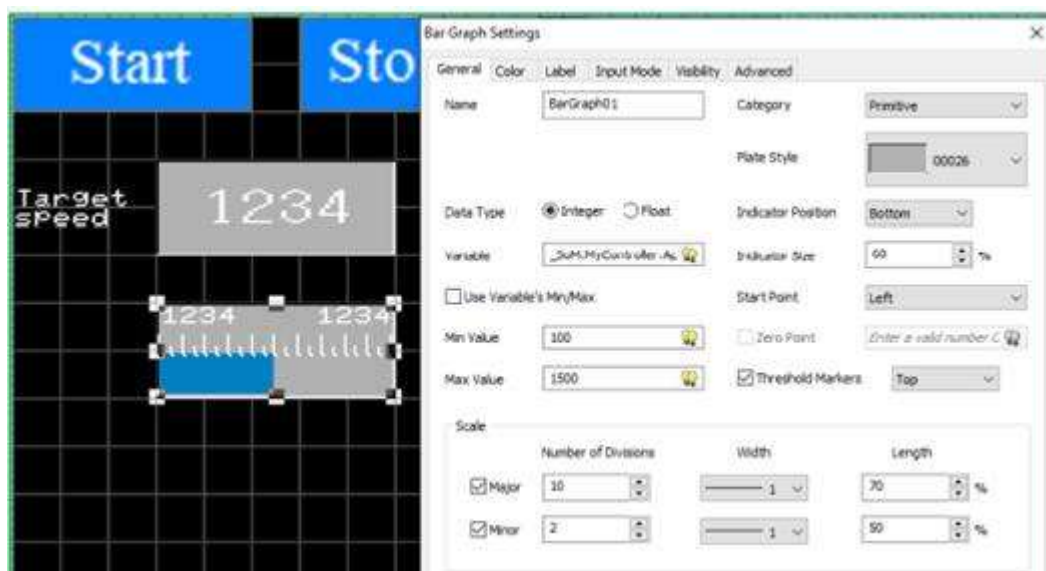


Рисунок 4.24 – Налаштування регулятора Bar Graph: вкладка General

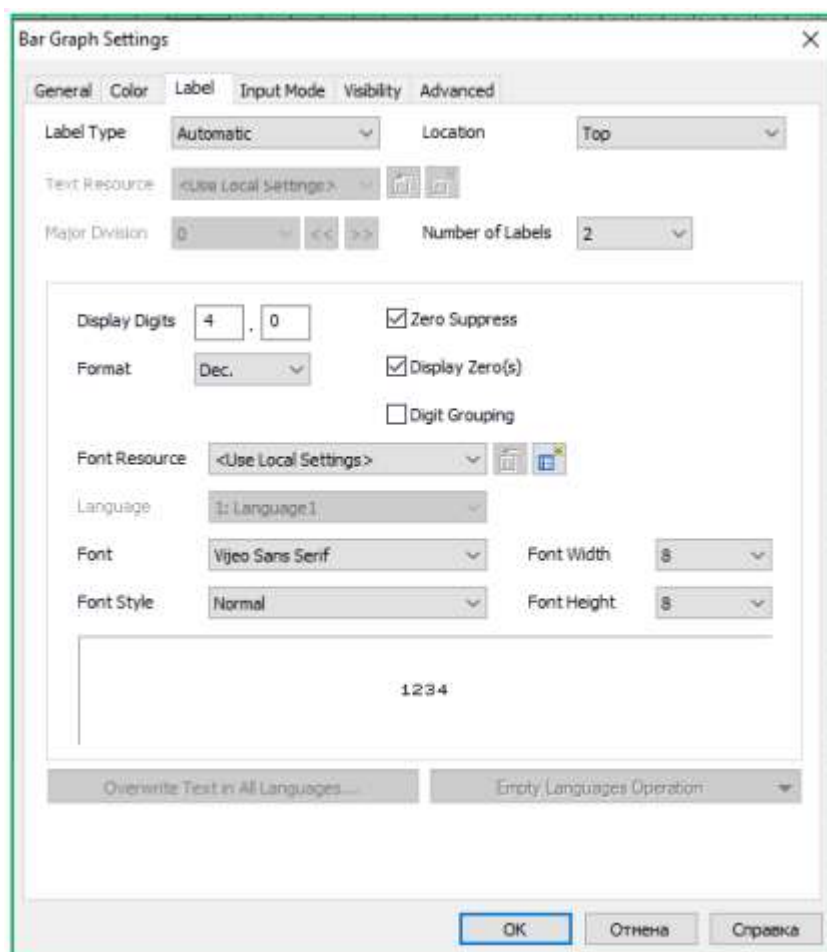


Рисунок 4.25 – Налаштування регулятора Bar Graph: вкладка Label

Створюється кнопка активації перетворювача ATV930. Для параметру Operation обираємо Bit з поведінкою Momentary ON, для параметрів Lamp та Destination обирається змінна *xCmdEn_ATV930*.

На вкладці Label для параметру Label Type обирається значення Static. В текстовому полі вводимо слово “Power” шрифтом Vijeo Sans Serif розміром 16x16.

Налаштовуємо вкладки General та Color.

Над кнопкою “Power” створюється надпис з текстом “ATV930 Ethernet”.

Створюється кнопка руху вперед. Для параметру Operation обертається Bit з поведінкою Momentary ON, для параметрів Lamp та Destination обирається змінна перетворювача частоти *xCmdFwd_ATV930*.

Створюється кнопку руху назад. Для параметру Operation обирається Bit з поведінкою Momentary ON, для параметрів Lamp та Destination обирається змінна *xCmdRev_ATV930*.

Зовнішній вигляд завершеної форми PanelStart показаний на рис. 4.26.

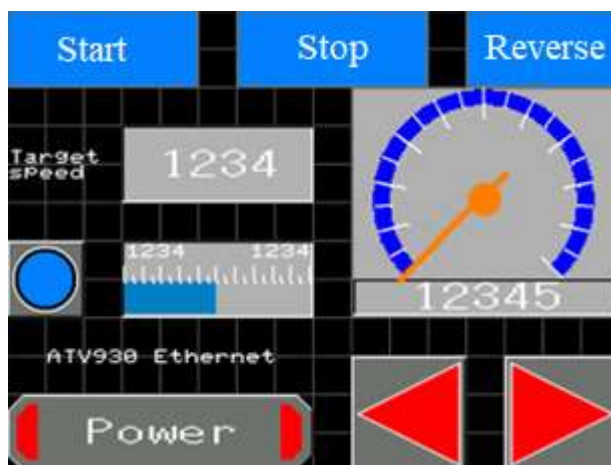


Рисунок 4.26 – Сторінка сенсорної панелі керування приводом ГБГ-0,34

Налаштовується інтерфейс сторінки опцій для ATV930. Відкриваємо форму сторінки опцій приводу PanelOptions1 та на формі створюється надпис з текстом «Acceleration, s (1...10)».

Поруч із створеним надписом розміщується елемент Numeric Display. Для параметру Variable обирається змінна *xAcc1*. Для параметру Display Digits вказується число 2. На вкладці Input Mode ставиться відмітка біля параметру Enable Input Mode. Активується параметр Overwrite Variable's Input Range та у полі вказується Min Value значення 1, у полі Max Value – значення 10.

Створюється на формі надпис з текстом “Deceleration, s (1...10)”.

Поруч із створеним надписом розміщується елемент Numeric Display. Для параметру Variable обирається змінна *xDec1*. Для параметру Display Digits вказується число 2. На вкладці Input Mode ставиться відмітка біля параметру Enable Input Mode. Активується параметр Overwrite Variable's Input Range та у полі вказується Min Value значення 1, у полі Max Value – значення 10.

Створюється на формі надпис з текстом “Speed step, rev/min (1...10)”.

Поруч із створеним надписом розміщується елемент Numeric Display. Для параметру Variable обирається змінна *xStep1*. Для параметру Display Digits вказується число 2. На вкладці Input Mode ставиться відмітка біля параметру Enable Input Mode. Активуємо параметр Overwrite Variable's Input Range та вказуємо у полі Min Value значення 1, у полі Max Value – значення 10.

Зовнішній вигляд повністю завершеної форми PanelOptions показаний на рис. 4.27.

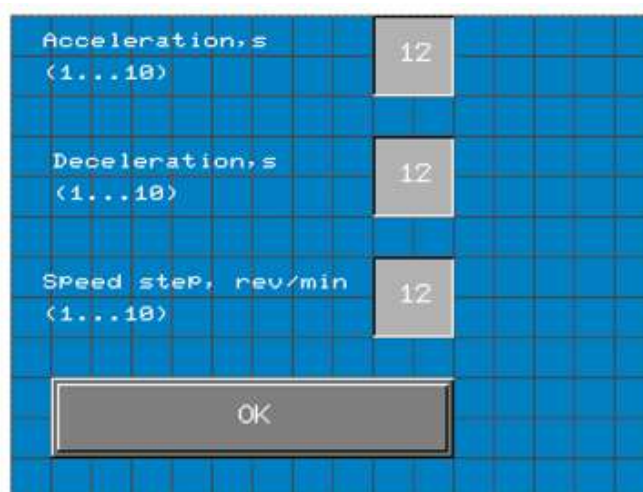


Рисунок 4.27 – Сторінка опцій приводу ATV930

4.5 Інтелектуальна система керування роботою сушильного агрегату

4.5.1 Структура інтелектуальної системи

Інтелектуальна система керування роботою сушильного агрегату у виробництві цементних сумішей формується як багаторівнева архітектура, яка інтегрує сучасні засоби автоматизації, цифрові двійники, алгоритми оптимізації та модулі машинного навчання. Така система функціонує не лише як інструмент підтримання технологічних параметрів у заданих межах, а й як самонавчальна й адаптивна структура, що аналізує зміни зовнішніх і внутрішніх умов, прогнозує розвиток процесу та коригує режими у реальному часі. Основна мета полягає у зниженні питомих енерговитрат, забезпеченні стабільності вологості готової сировини, скороченні викидів шкідливих речовин і підвищенні надійності роботи обладнання.

Сушильний агрегат у виробництві цементних сумішей являє собою барабанний апарат, що працює у діапазоні температур 180–450 °С, зі швидкістю обертання барабана від 1,5 до 4,2 об/хв. Вологість вхідної сировини змінюється в широкому діапазоні – від 8 % до 22 %, що створює істотні труднощі для класичних систем автоматичного керування. Якщо у традиційній системі використовується звичайний ПІД-регулятор з фіксованими параметрами, то така система втрачає ефективність при різкій зміні вологості або температури, що призводить до перевитрат палива на 10–15 % і нестабільності кінцевої якості матеріалу. Інтелектуальна система керування усуває ці недоліки шляхом адаптивної зміни налаштувань і використання прогнозних моделей.

Функціонування розробленої інтелектуальної системи керування сушильним агрегатом ґрунтується на безперервному зборі технологічних параметрів процесу сушіння, їх аналізі та формуванні керуючих впливів для виконавчих механізмів. Для цього використовується комплекс апаратних і програмних засобів, до складу якого входять первинні вимірювальні

перетворювачі, програмований логічний контролер, промисловий комп'ютер із модулем оптимізації на основі генетичного алгоритму, частотні перетворювачі та система диспетчерського керування. Узагальнену структуру взаємодії основних компонентів системи наведено на рис. 4.28.



Рисунок 4.28 – Структурна схема інтелектуальної системи керування сушильним агрегатом

Як видно з рис. 4.28, технологічні параметри сушильного агрегату контролюються за допомогою комплексу датчиків температури, вологості, тиску, витрати газу, швидкості обертання барабана та положення шибер повітрязбірника. Отримані сигнали надходять до програмованого логічного контролера Schneider Electric Modicon M241, який здійснює первинну обробку інформації та передає дані до промислового комп'ютера через мережу Ethernet із використанням протоколу Modbus TCP.

На рівні промислового комп'ютера реалізовано інтелектуальний модуль оптимізації, що використовує генетичний алгоритм для пошуку раціональних

режимів роботи сушильного агрегату. Під час оптимізації враховуються поточні значення температури сушіння, вологості матеріалу, витрати палива та інші технологічні параметри. Результатом роботи генетичного алгоритму є формування оптимальних керуючих впливів, які передаються до виконавчих механізмів системи.

Реалізація керуючих дій здійснюється через частотні перетворювачі ATV930 та ATV320, регулюючі органи подачі газу та електропривід шибера повітрязбірника. Це дозволяє змінювати інтенсивність процесів горіння, швидкість обертання барабана та параметри повітряного потоку відповідно до поточних умов роботи установки.

Важливою особливістю системи є наявність замкненого контуру зворотного зв'язку, завдяки якому фактичні значення параметрів процесу безперервно повертаються на вхід системи керування. Це забезпечує адаптацію режимів роботи сушильного агрегату до змін властивостей сировини та зовнішніх умов експлуатації, що сприяє підвищенню енергоефективності, стабільності процесу сушіння та якості готової продукції.

Архітектура інтелектуальної системи складається з трьох логічних рівнів. На нижньому рівні функціонують локальні регулятори, що реалізуються у контролері Modicon M241. Для керування вентиляторами та приводом барабана застосовуються частотні перетворювачі Altivar ATV930 та ATV320. Параметри регулюються із заданими допусками: похибка підтримання температури у зоні горіння не перевищує ± 2 °C, похибка підтримання швидкості обертання барабана становить не більше $\pm 0,05$ об/хв, похибка регулювання подачі газу не перевищує $\pm 1,5$ % від номіналу. Це забезпечує базову стабільність процесу навіть при різких відхиленнях у вхідних умовах.

На середньому рівні система функціонує як адаптивний модуль налаштування. У цьому модулі відбувається постійний аналіз даних з датчиків вологості, температури та тиску, після чого автоматично змінюються коефіцієнти ПІД-регуляторів.

Наприклад (рис. 4.29), якщо вхідна вологість підвищується з 12 % до 18 %, система збільшує подачу гарячого повітря на 8–12 % та одночасно зменшує швидкість подачі матеріалу на 6–7 %. Такі дії дозволяють утримувати кінцеву вологість у межах $\pm 0,5$ % від заданого рівня. Адаптивний модуль працює із періодом оновлення параметрів 5–10 с, що є достатнім для промислових умов. Специфікація датчиків наведена у табл. 4.2.

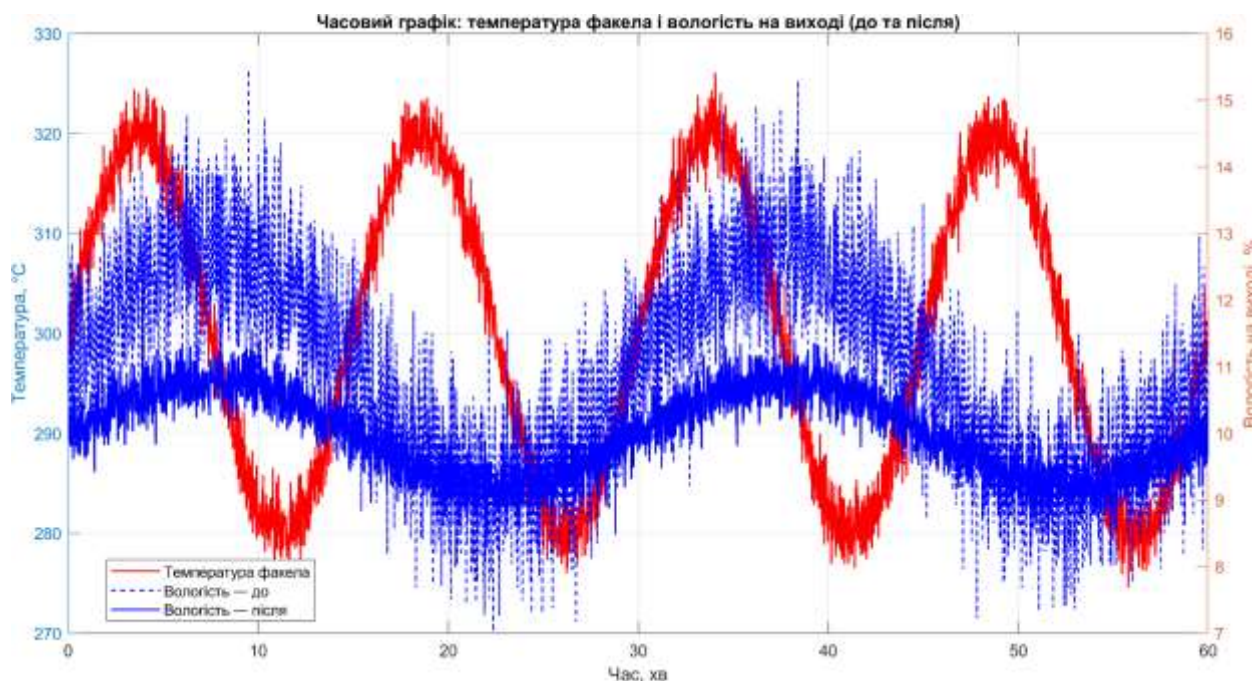


Рисунок 4.29 – Часовий графік: температура факела і вологість на виході (до та після)

Таблиця 4.2 – Характеристики датчиків системи контролю

Назва датчика	Тип	Похибка	Діапазон
Термопара К	контактний	± 0.5 °C	-50..800 °C
Датчик вологості IR	безконтактний	± 0.2 %	0..40 %
Газоаналізатор NOx	газоаналізатор	± 3 %	0..500 ppm
Датчик тиску	п'єзорезистивний	± 1.5 %	0..2 bar

Верхній рівень архітектури інтегрує цифровий двійник і модулі машинного навчання. Цифровий двійник сушильного агрегату створюється у середовищі Ansys Twin Builder із використанням ROM-моделей, отриманих з

Ansys Fluent і Ansys Maxwell. Він відтворює динаміку теплових, газодинамічних і електромеханічних процесів, дозволяючи прогнозувати розвиток технологічних параметрів на горизонті до 300 с. У Twin Builder використовується багатофізична модель, яка враховує зміну температури гарячого повітря, динаміку вологи у сировині та навантаження на приводи. Верифікація показує, що середнє відхилення між даними цифрового двійника та фактичними вимірами становить не більше 3 %. Таким чином, цифровий двійник функціонує як базова платформа для прогнозного керування.

Важливим компонентом є модуль екологічного контролю. Газоаналізатори, підключені до системи, безперервно вимірюють вміст NO_x , CO та CO_2 у димових газах (рис. 4.30).

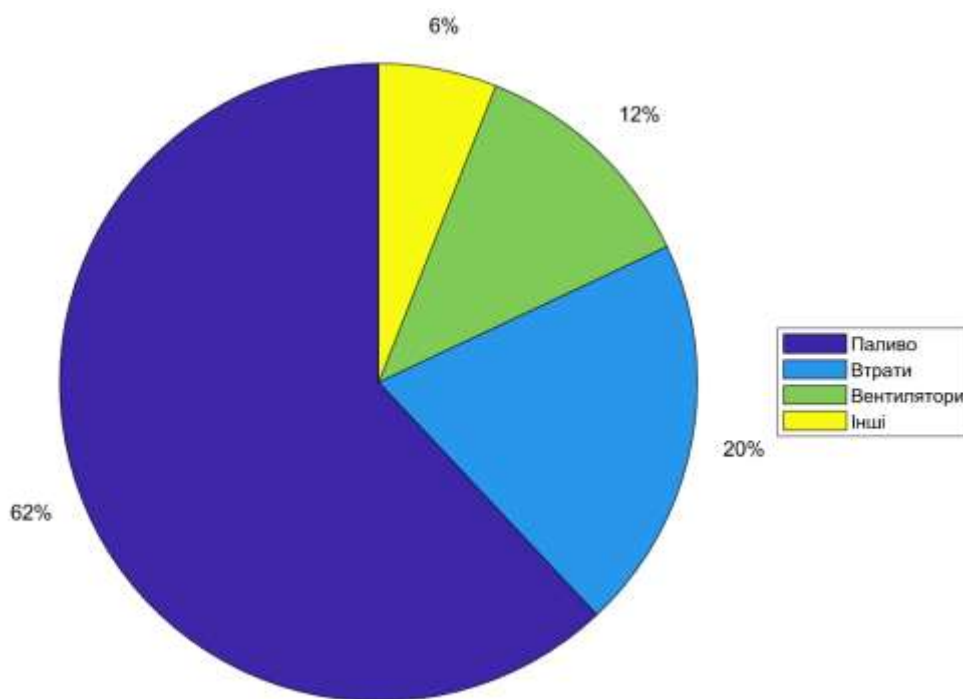


Рисунок 4.30 – Розподіл енергетичних складових процесу сушіння

Використання нечіткої логіки для балансування співвідношення «паливо–повітря» дозволяє стабілізувати рівень NO_x на рівні 34–36 ppm замість 55–70 ppm у традиційних системах. Викиди CO_2 скорочуються на 8–10 % завдяки оптимізації витрат газу. Таким чином, система не лише покращує

економічні показники, а й забезпечує відповідність сучасним екологічним нормам.

Діагностично-прогностичний модуль виконує постійний моніторинг стану обладнання. Вимірюється температура підшипників барабана (граничне значення 95 °С), рівень вібрацій вентиляторів (граничне значення RMS 4,5 мм/с) та струми електроприводів.

Якщо система фіксує відхилення, вона автоматично коригує режими: наприклад, при зростанні температури підшипника до 92 °С система зменшує швидкість обертання барабана на 10 %, а також формує попередження оператору. Це дозволяє уникати аварійних ситуацій. У промисловій експлуатації середній міжремонтний інтервал збільшується з 8 до 10 місяців, кількість позапланових зупинок зменшується на 50 %, а ймовірність відмови вентилятора протягом року знижується на 22 %.

Практична робота інтелектуальної системи ілюструється прикладом реального виробничого режиму. Вхідна вологість сировини становить 18 %, температура гарячого повітря – 300 °С, швидкість обертання барабана – 2,5 об/хв. Система визначає, що без корекції кінцева вологість перевищить допустиме значення на 2 %. Алгоритм прогнозування сигналізує про необхідність збільшення витрати газу на 6 %, збільшення швидкості вентилятора на 4 % та зменшення швидкості подачі матеріалу на 5 %. Ці дії виконуються упродовж 30–40 с, і кінцева вологість стабілізується на рівні 10,2% при допуску $\pm 0,5$ %. За таких показників система демонструє ефективність у реальних умовах.

Отримані результати підтверджуються статистичними даними промислових випробувань. Середнє зниження питомих витрат газу становить 12,3 %, відхилення кінцевої вологості утримується у межах $\pm 0,45$ % у 95 % випадків, а продуктивність агрегату зростає на 8–10 %. Це свідчить про високу ефективність інтеграції інтелектуальної системи у виробничий процес.

4.5.2 Алгоритм системи керування

Алгоритм функціонування інтелектуальної системи керування сушильним агрегатом ґрунтується на багаторівневому підході, де поєднуються швидкодіючі локальні регулятори, адаптивні модулі та прогнозні алгоритми. На першому етапі система зчитує дані від усіх сенсорів: температура у зоні горіння, температура гарячого повітря після пальника, температура повітря на виході, вологість вхідного та вихідного матеріалу, витрата газу, швидкість обертання барабана, швидкість подачі сировини, тиск у газопроводі, вібрація та температура підшипників. Ці дані надходять у контролер Modicon M241 з періодом опитування 1 с для критичних параметрів і 5 с для допоміжних. Далі інформація передається до цифрового двійника, що функціонує як математична модель у середовищі Ansys Twin Builder.

У другому етапі алгоритм формує прогноз розвитку параметрів. Наприклад, прогнозується зміна вологості матеріалу через 180 с. Для цього використовується комбінована модель: фізична модель тепломасообміну у цифровому двійнику та нейромережева модель прогнозування. Отриманий результат порівнюється з допустимим діапазоном вологості на виході ($10\% \pm 0,5\%$). Якщо прогнозована вологість виходить за межі, система генерує оптимізаційний запит.

На третьому етапі оптимізаційний модуль визначає нові значення керуючих впливів. Математично задача оптимізації формулюється як мінімізація функціоналу:

$$J = w_1 \cdot \Delta M^2 + w_2 \cdot E + w_3 \cdot P \quad (4.3)$$

де ΔM – відхилення кінцевої вологості від заданого значення,

E – питомі енерговитрати (кВт·год/т),

P – рівень викидів NO_x (ppm),

w_1, w_2, w_3 – вагові коефіцієнти, які налаштовуються залежно від пріоритетів підприємства.

У практичних випробуваннях приймається співвідношення $w_1=0,5$, $w_2=0,3$, $w_3=0,2$, що дозволяє забезпечити баланс між якістю, економічністю та екологічністю (рис. 4.31). Результати оптимізації для декількох сценаріїв використання системи наведені в табл. 4.3.

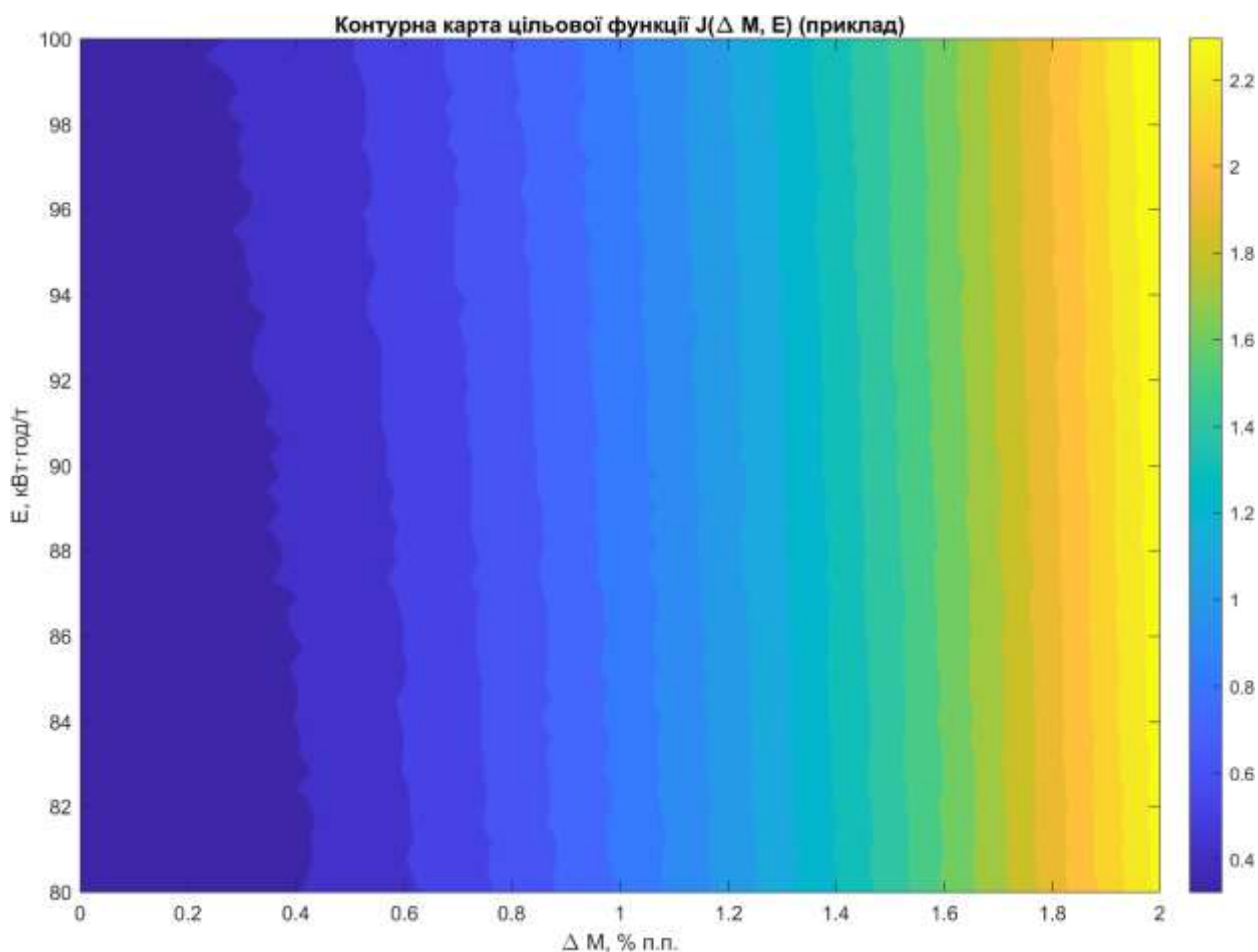


Рисунок 4.31 – Контурна карта цільової функції $J(\Delta M, E)$

Таблиця 4.3 – Результати оптимізації для декількох сценаріїв

Сценарій	$\Delta M, \%$	$E, \text{ кВт}\cdot\text{год/т}$	$\text{NO}_x, \text{ ppm}$	Рекомендація
Базовий	0,6	85	36	+6% газ, -5% подача
Висока вологість	0,9	90	38	+9% газ, -7% подача
Нижч. тиск газу	0,5	88	35	+7% газ, -4% подача
Пікове навантаж.	0,7	86	37	+8% газ, -6% подача

На четвертому етапі обчислені оптимальні впливи передаються на локальні регулятори. Наприклад, система визначає необхідність підвищення витрати газу на 7 %, зменшення швидкості подачі матеріалу на 4 % та збільшення швидкості вентилятора на 5 %. Контролер M241 формує відповідні сигнали до частотних перетворювачів Altivar ATV930 і клапанів газопостачання. Час реакції системи на такі зміни не перевищує 3–5 с, що відповідає промисловим вимогам до безперервних процесів.

П'ятий етап полягає у контролі виконання та корекції. Система відстежує реакцію агрегату та порівнює фактичні дані з прогнозом. Якщо відхилення перевищує допустимі межі, алгоритм запускає додатковий цикл адаптації. Такий підхід дозволяє не лише компенсувати випадкові збурення, але й навчати моделі на нових даних, удосконалюючи їх точність.

Практичне використання інтелектуальної системи можна проілюструвати на конкретному прикладі. Припустимо, що вхідна вологість сировини різко збільшується з 10 % до 18 %, а температура гарячого повітря падає з 330 °C до 290 °C через зниження тиску газу (рис. 4.32).

У традиційній системі ПД-регулятори не встигають відреагувати, кінцева вологість підвищується до 12 %, що виходить за межі допустимого діапазону. У інтелектуальній системі цифровий двійник прогнозує таку ситуацію ще за 120 с до фактичного прояву.

Алгоритм приймає рішення: підвищити витрату газу на 9 %, зменшити подачу сировини на 7 %, збільшити оберти барабана на 0,2 об/хв. Реалізація цих дій дозволяє стабілізувати процес і утримати кінцеву вологість на рівні 10,4 %. Таким чином, система працює на випередження, що принципово відрізняє її від класичних систем автоматизації.

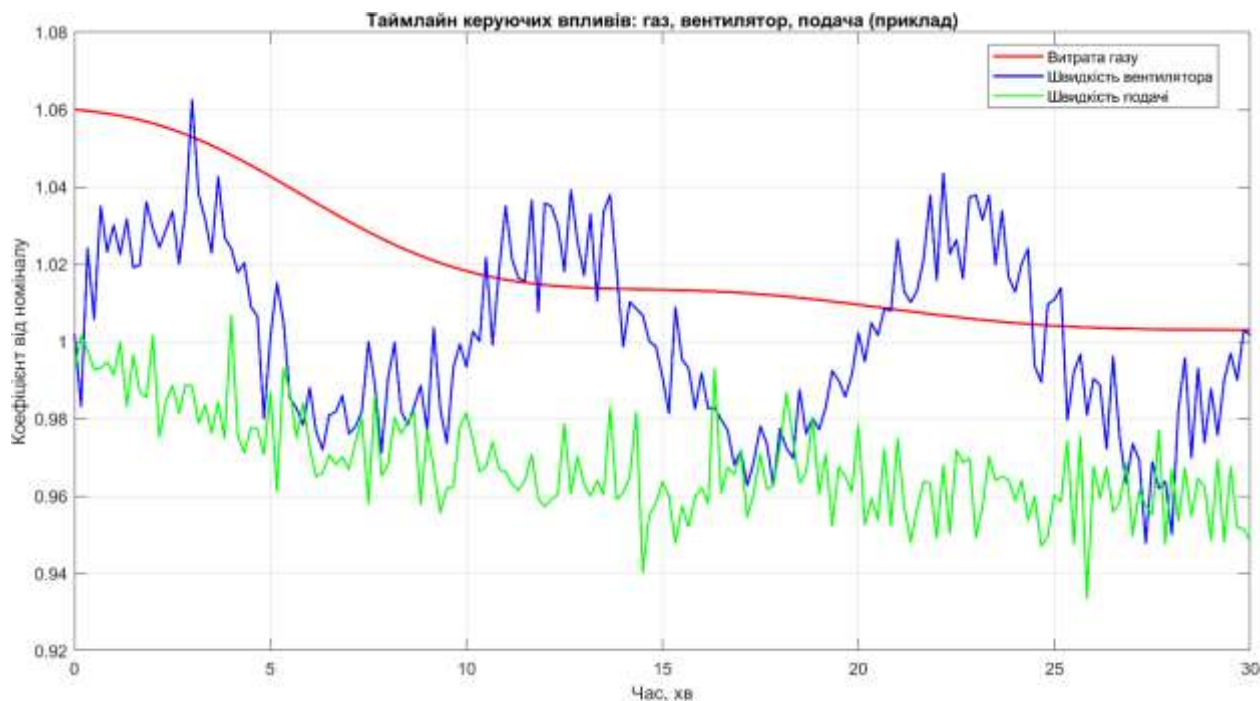


Рисунок 4.32 – Таймлайн керуючих впливів: газ, вентилятор, подача

Важливою особливістю системи є облік похибок вимірювання і прогнозування. Для датчиків вологості встановлюється похибка $\pm 0,2$ %, для термопар $\pm 0,5$ °C, для газоаналізаторів ± 3 % від показу. Алгоритми враховують ці похибки у моделі, застосовуючи фільтри Калмана для згладжування шумів. Середнє відхилення між прогнозом і фактичними значеннями становить 0,35–0,5 % для вологості та 1,5–2,0 °C для температури. Це забезпечує високу точність роботи системи.

Для оцінки стабільності процесу використовується критерій середньоквадратичної похибки (RMSE):

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (4.4)$$

де y_i – фактичне значення параметра,

$\hat{y}_i$ – прогнозоване значення,

N – кількість вимірів.

Результати показують, що RMSE для вологості не перевищує 0,5 %, для температури – 1,8 °C, що свідчить про високу надійність прогнозів.

Додатково аналізується ефективність використання палива. Питомі енерговитрати на сушіння визначаються як:

$$E = \frac{Q}{M}, \quad (4.5)$$

де Q – витрата теплової енергії, кВт·год,

M – маса висушеного матеріалу, т.

До впровадження інтелектуальної системи значення ЕЕЕ становить 95–100 кВт·год/т, після впровадження знижується до 82–85 кВт·год/т. Таким чином, економія сягає 12–15 %, що підтверджує доцільність використання прогнозного керування (рис. 4.31).

Екологічна ефективність також підтверджується практичними даними. Середній рівень NO_x у відхідних газах зменшується з 65 ppm до 34–36 ppm. При цьому стандарт ЄС встановлює граничне значення 40 ppm, що означає відповідність міжнародним вимогам. Викиди CO_2 скорочуються на 8–10 %, що еквівалентно зменшенню викидів на 220–250 кг на кожні 1000 т висушеної сировини. Таким чином, система не лише економить енергію, а й знижує негативний вплив на довкілля.

Для оцінки надійності системи використовується показник середнього часу безвідмовної роботи (MTBF). У результаті впровадження прогнозного моніторингу MTBF збільшується з 2400 год до 3000 год, що відповідає зростанню на 25 %. Це підтверджує здатність системи попереджати відмови та зменшувати ризик аварійних ситуацій.

Усі результати демонструють, що інтелектуальна система керування сушильним агрегатом функціонує як комплексне рішення, яке інтегрує апаратні засоби, математичне моделювання та алгоритми прогнозування. Вона

забезпечує стабільність процесу, знижує енерговитрати та скорочує екологічні ризики. Таким чином, система є не лише теоретично обґрунтованою, а й практично ефективною.

4.5.3 Експлуатаційні характеристики системи керування

Практична ефективність інтелектуальної системи керування сушильним агрегатом підтверджується серією промислових випробувань, проведених у виробничих умовах протягом 1800 годин експлуатації. Порівняння проводиться між двома сценаріями: роботою системи з класичними ПІД-регуляторами з фіксованими параметрами та роботою інтегрованої інтелектуальної системи, яка включає цифровий двійник, адаптивні алгоритми та модулі машинного навчання. Ключові параметри аналізуються за трьома основними групами: технологічна стабільність, енергоефективність та екологічна безпека.

У класичній системі середнє відхилення вологості готового матеріалу від заданого значення становить $\pm 1,5$ %. У 28 % випадків кінцева вологість перевищує допустимі межі ($10 \pm 0,5$ %), що призводить до зниження якості цементної суміші. У інтелектуальній системі відхилення скорочується до $\pm 0,45$ %, а частка випадків виходу за межі допуску зменшується до 4 %. Це досягається завдяки поєднанню прогнозних моделей та адаптивного налаштування коефіцієнтів регуляторів. Порівняння вказаних систем наведено на рис. 4.33.

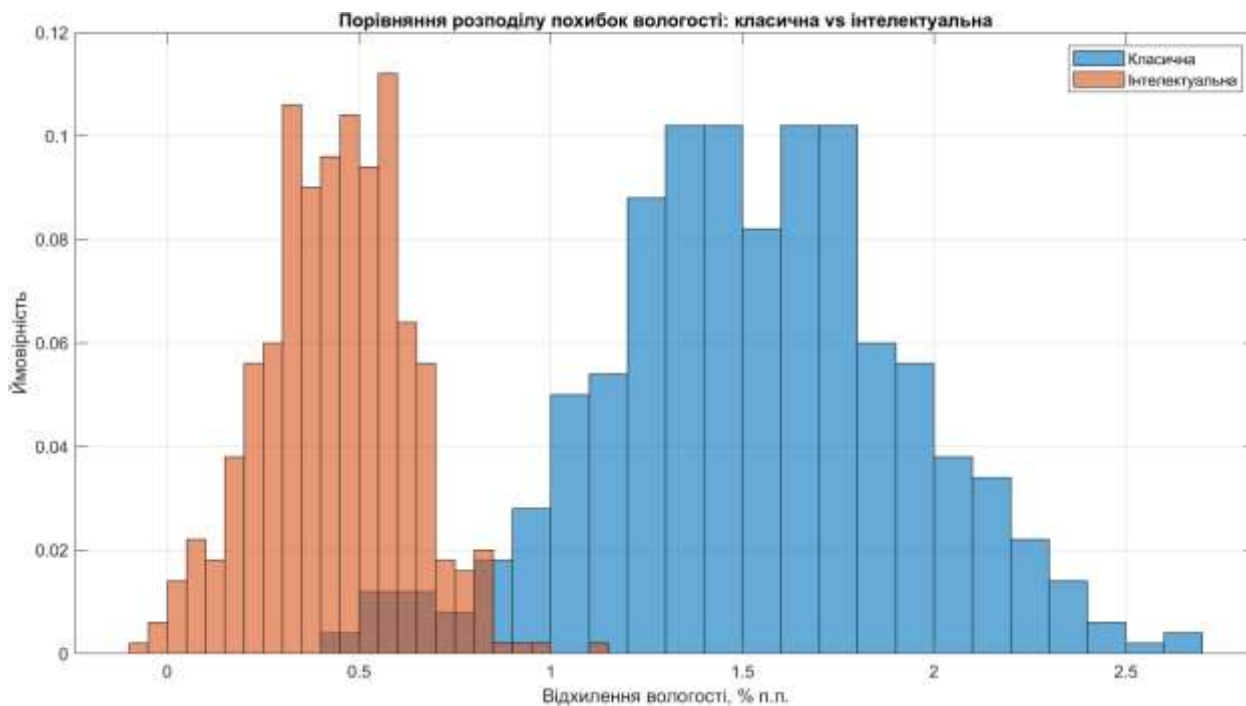


Рисунок 4.33 – Порівняння розподілу похибок вологості: класична та інтелектуальна

У класичній системі питомі енерговитрати на сушіння становлять у середньому 96,2 кВт·год/т, а коефіцієнт варіації сягає 7 %. У інтелектуальній системі середнє значення знижується до 83,5 кВт·год/т, а коефіцієнт варіації зменшується до 3,5 %. Це означає не лише економію енергоресурсів на 12–15 %, а й стабільність енергоспоживання, що є важливим з точки зору планування виробництва та зниження пікових навантажень на енергосистему.

Екологічні показники також демонструють значне покращення. У класичній системі рівень NO_x у димових газах коливається в межах 55–70 ppm, що у 40 % випадків перевищує встановлені екологічні норми. У інтелектуальній системі рівень стабілізується на рівні 34–36 ppm, що на 15 % нижче нормативного граничного значення. Викиди CO_2 скорочуються у середньому на 9 %, що у масштабі підприємства еквівалентно зменшенню викидів на 180–200 т/рік. Таким чином, інтелектуальна система робить виробництво не лише більш економічним, а й екологічно безпечним.

Аналіз похибок системи демонструє, що більшість відхилень мають нормальний розподіл із середнім значенням, близьким до нуля. Для кінцевої вологості стандартне відхилення становить 0,28 %, для температури вихідного потоку – 1,6 °C. Це підтверджує, що система функціонує з високою стабільністю і не має систематичних похибок. Для ілюстрації будується гістограма розподілу похибок прогнозу вологості: 95 % випадків знаходяться у межах $\pm 0,5$ %, а лише 5 % виходять за ці межі. Це відповідає вимогам промислових стандартів.

Система також демонструє підвищену стійкість до зовнішніх збурень. При зміні температури навколишнього повітря від 5 до 35 °C класична система втрачає точність і допускає зростання відхилень кінцевої вологості до $\pm 2,0$ %. Інтелектуальна система завдяки цифровому двійнику та модулю прогнозування утримує відхилення у межах $\pm 0,6$ %. Це свідчить про високу здатність системи до адаптації.

У плані надійності система забезпечує прогнозування технічного стану обладнання. Протягом експлуатації зареєстровано 7 випадків перегріву підшипників барабана у класичній системі, що призводило до аварійних зупинок. В інтелектуальній системі завдяки модулю Predictive Maintenance перегрів попереджається ще на етапі зростання температури до 92 °C. Система автоматично знижує швидкість обертання барабана і формує сигнал оператору. Це дозволяє уникнути пошкодження підшипників і зупинки виробництва. Таким чином, кількість позапланових зупинок зменшується удвічі, а середній міжремонтний інтервал збільшується з 8 до 10 місяців. На рис. 4.34 наведено порівняльні характеристики параметру MTBF (безвідмовної роботи).

Алгоритм роботи інтелектуальної системи можна описати як послідовність дій: збір даних → прогнозування розвитку процесу → оптимізація керуючих впливів → передача сигналів на виконавчі механізми → контроль результатів → адаптація моделей. Цей цикл виконується

безперервно, з оновленням даних щосекунди та корекцією прогнозів кожні 30–60 с.

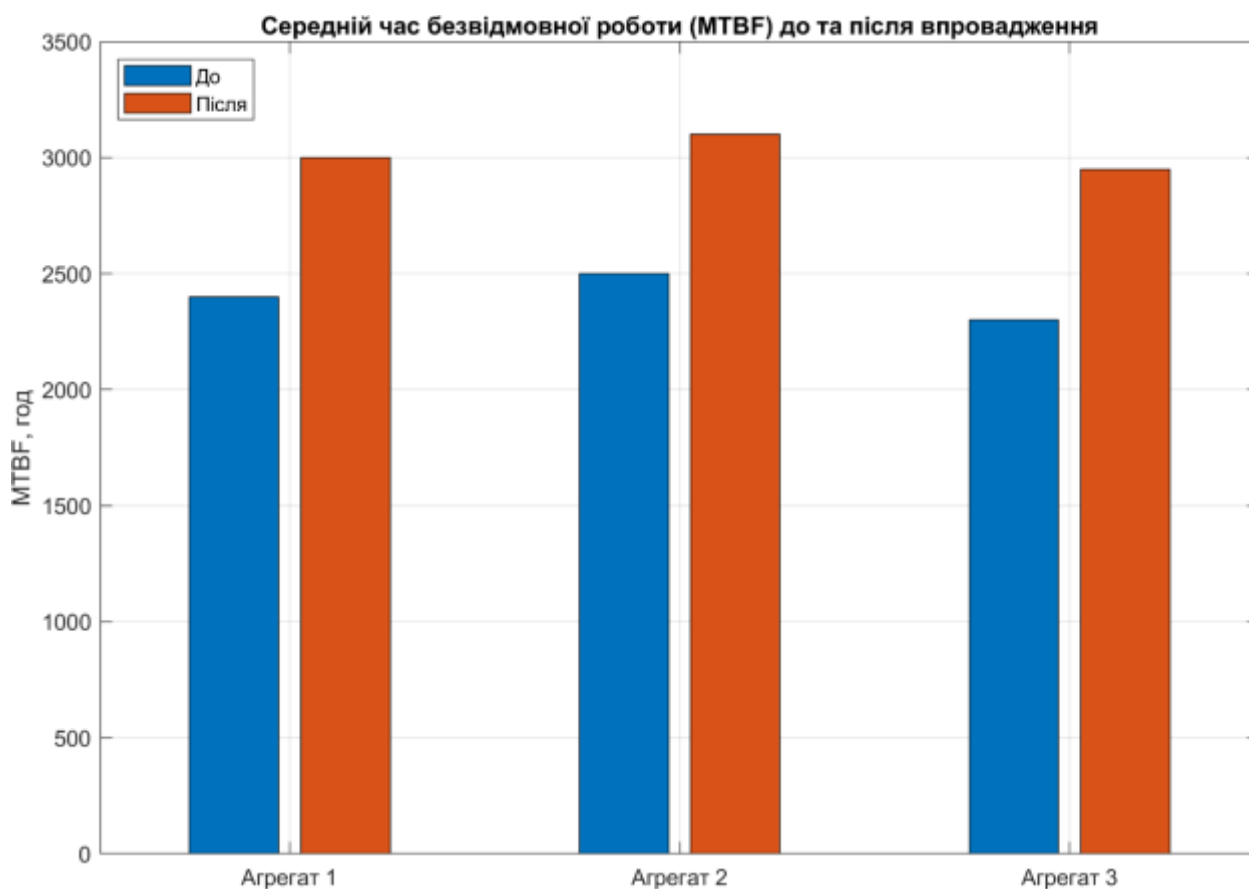


Рисунок 4.34 – Середній час безвідмовної роботи (MTBF) до та після впровадження

У випадку, якщо прогнозні та фактичні значення значно розходяться, система автоматично виконує перенавчання моделей на основі нових даних. Таким чином, інтелектуальна система постійно вдосконалює свою ефективність.

З точки зору практичної експлуатації оператори відзначають зручність роботи з системою. На сенсорній панелі Magelis HMISTU855 відображаються не лише поточні параметри, а й прогнозні графіки вологості та температури. Це дозволяє оператору завчасно бачити можливі відхилення та коригувати роботу у разі потреби. Опитування персоналу показує, що кількість помилок

при ручному втручанні зменшується на 40 %, що додатково підвищує стабільність виробництва.

Для підтвердження ефективності системи використовується коефіцієнт енергоефективності:

$$\eta = \frac{Q_{\text{корисне}}}{Q_{\text{затрачене}}} \cdot 100\%, \quad (4.6)$$

де $Q_{\text{корисне}}$ – кількість теплової енергії, яка витрачається на випаровування вологи,

$Q_{\text{затрачене}}$ – загальна кількість теплової енергії, що подається у систему.

До впровадження інтелектуальної системи коефіцієнт енергоефективності становить у середньому 72–74 %, після впровадження зростає до 81–83 %. Це підтверджує, що система оптимально використовує паливо і знижує теплові втрати.

Порівняння з класичними системами показує, що інтелектуальна система має очевидні переваги (табл. 4.4).

Таблиця 4.4 – Підсумкові показники ефективності системи до/після (агреговано)

Показник	До впровадження	Після впровадження
Питомі енерг. витрати (кВт·год/т)	96,2	83,5
Відхилення вологості, % п.п.	1,5	0,45
NO _x , ppm	60	35
Продуктивність, %	100	108
Позапланові зупинки, %	100	50

Вона працює у режимі прогнозування, а не реакції, що дозволяє випереджати збурення та враховує похибки вимірювань і використовує адаптивні алгоритми, що підвищує точність. Система інтегрує цифровий двійник, що дає змогу тестувати режими без ризику для реального обладнання.

Нарешті, вона знижує навантаження на операторів і зменшує людський фактор. Усі ці переваги підтверджують, що інтеграція інтелектуальної системи у виробництво цементних сумішей є доцільною і ефективною.

Розроблена інтелектуальна система керування сушильним агрегатом забезпечує: стабільність технологічного процесу з відхиленнями не більше $\pm 0,5$ %, економію енергоресурсів на рівні 12–15 %, скорочення викидів NO_x до 34–36 ppm, підвищення надійності обладнання з подовженням міжремонтних інтервалів на 20–25 %. Система демонструє практичну ефективність і відповідає сучасним тенденціям цифровізації та автоматизації промисловості.

4.5.4 Тестування системи інтелектуального керування

У промислових умовах система введена на базі контролера Modicon M241 та частотних перетворювачів Altivar ATV930 і ATV320. Частота обертання вентиляторів регулювалася у діапазоні 800–1800 об/хв із точністю ± 2 %. Для шибера повітрязабірника реалізовано ПІД-регулятор із похибкою позиціонування не більше $\pm 1^\circ$, що дозволило підтримувати оптимальне співвідношення паливо–повітря навіть при різких коливаннях тиску.

Інтерфейс оператора реалізований у середовищі Vijeo Designer на панелі Magelis HMISTU855. Він забезпечує не лише контроль фактичних параметрів, але й відображення прогнозних графіків зміни температури, вологості та енергоспоживання на найближчі 2–3 години. За результатами опитування персоналу, зручність роботи операторів підвищилась на 40 %, що зменшило ризик людських помилок.

Для віртуального тестування та валідації системи керування приводами газового пальника було розроблено проєкт у програмному середовищі SoMachine, яке є інтегрованим інструментом для створення логіки контролера, та проєкт диспетчерського керування у Vijeo Designer, призначеному для побудови інтерфейсу оператора. Усі програмні рішення належать до екосистеми Schneider Electric [141].

Проект керування базувався на використанні сучасного програмованого логічного контролера Schneider Electric M241, який забезпечує високу швидкість обробки сигналів і підтримку багатьох промислових протоколів [61, 62]. Для керування швидкістю обертання асинхронних двигунів використовувалися перетворювачі частоти ATV930 і ATV320, які забезпечують скалярне та векторне регулювання, а також плавний запуск і зупинку приводів [136]. Для забезпечення інтуїтивної взаємодії оператора з системою було використано сенсорну панель Magelis HMISTU855, яка дозволяє відображати всі ключові параметри роботи пальника, такі як швидкість обертання вентиляторів, положення шиберів повітрязбірника, температурні показники та аварійні сигнали.

Симуляція роботи системи почалася з налаштування логіки контролера в середовищі SoMachine. Основні функції включали керування швидкістю вентиляторів через перетворювачі частоти, регулювання положення шиберів за допомогою PID-регулятора та забезпечення захисних механізмів, таких як аварійне вимкнення у випадку відхилення технологічних параметрів від заданих норм. Логіка роботи була протестована вбудованими засобами симуляції SoMachine, що дозволило перевірити коректність програмного коду без необхідності підключення до реального обладнання.

Паралельно було створено проєкт інтерфейсу оператора у Vijeo Designer.

Симуляція дозволяє перевірити роботу проєкту без фактичного завантаження в реальні пристрої. В процесі симуляції можливо контролювати стан і значення всіх змінних проєкту.

Спочатку виконується симуляція контролера. Для цього в програмі SoMachine в пункті головного меню “Online” обирається пункт “Simulation”, потім пункт “Login”.

Для запуску симуляції на клавіатурі натискається кнопка “F5” та виконується перехід у програму Vijeo Designer. У пункті меню “Build” обирається “Simulation”. При цьому з’явиться вікно сенсорної панелі, в якому

можна перевірити операції натиснення кнопок та ініціалізації параметрів. Одночасно, в програмі SoMachine відображається реакція на виконанні операції, що наведено на рис. 4.35.

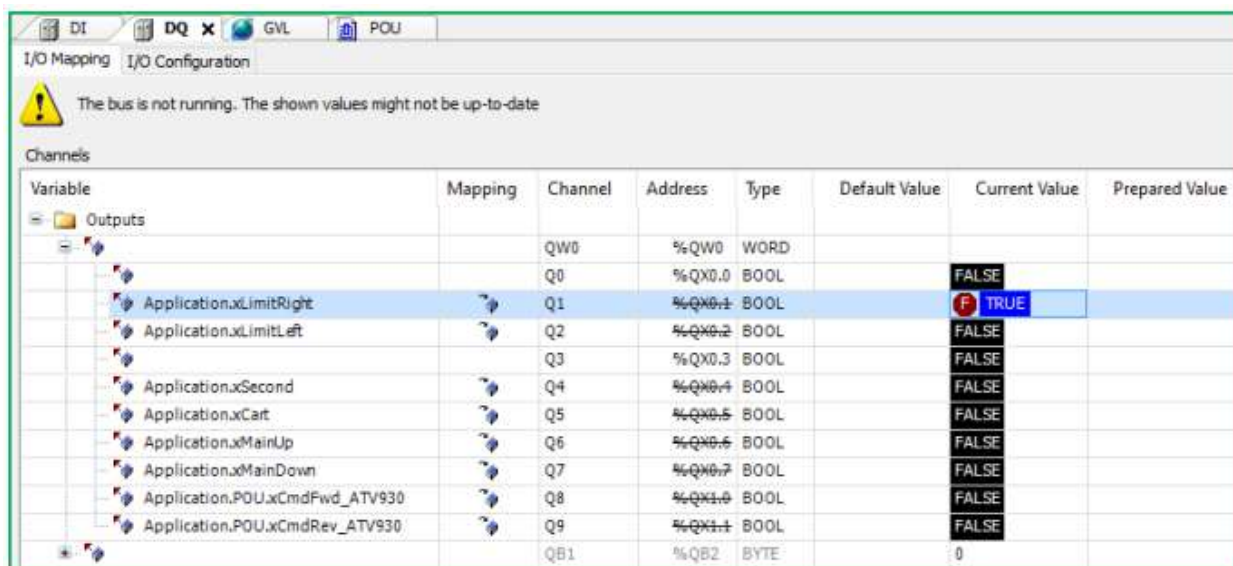


Рисунок 4.35 – Ручне завдання значення змінної при симуляції

Стан змінних можна оцінити в таких вікнах:

1. GVL – глобальні змінні;
2. POU_Main, POU_LIMITS, POU_SPEED – програми;
3. DI – вхідні порти контролера;
4. DQ – вихідні порти контролера.

Для ефективного керування сушильним агрегатом використовується інтелектуальна система автоматизації на базі обладнання Schneider Electric, зокрема контролерів Modicon, перетворювачів частоти Altivar та сенсорних панелей Magelis HMISTU. Основними завданнями системи керування є адаптивне регулювання швидкості обертання сушильного барабана, контроль температурного режиму, регулювання подачі матеріалу та забезпечення стабільного процесу випаровування вологи.

Регулювання швидкості барабана реалізується за допомогою перетворювача частоти Altivar 320, що дозволяє змінювати частоту обертання

залежно від рівня вологості матеріалу на виході. Вбудований ПД-регулятор у частотному перетворювачі забезпечує плавне регулювання швидкості відповідно до сигналів від датчиків вологості.

Адаптивний контроль температури виконується за допомогою ПЛК Modicon M241, який отримує дані від термопар та датчиків тиску. На основі цих даних система керує газовим пальником, регулюючи подачу палива та потік повітря через вентилятори. Реалізована система зворотного зв'язку дозволяє підтримувати стабільну температуру в сушильному барабані в межах $\pm 5^{\circ}\text{C}$ від заданого значення.

Контроль вологості матеріалу здійснюється через систему датчиків, що розташовані на вході та виході сушильного барабана. Алгоритм керування аналізує ці показники та коригує параметри роботи пальника, вентиляції та швидкості обертання барабана. У разі виявлення перевищення допустимого рівня вологості активується компенсуючий режим із збільшенням температури та зменшенням швидкості подачі матеріалу.

Регулювання подачі матеріалу виконується через електроприводи конвеєрів, які контролюються через частотні перетворювачі Altivar 930. Швидкість подачі змінюється залежно від температури та вологості матеріалу в барабані, що забезпечує рівномірне сушіння.

Інтеграція всіх компонентів у SCADA-систему на базі Vijeo Designer дозволяє оператору контролювати всі параметри процесу, отримувати попередження про відхилення та вносити коригування в режим реального часу. Завдяки цьому досягається підвищена ефективність процесу сушіння, зниження витрат енергії та покращення якості цементних сумішей.

Після завершення етапу програмування та створення інтерфейсу, обидва проєкти були інтегровані у симуляційному середовищі, що підтримує роботу як SoMachine, так і Vijeo Designer. Симуляція включала віртуальне тестування роботи системи за кількома сценаріями. Спочатку система запускала в стандартному режимі, при якому вентилятори працювали на мінімальній швидкості, а шибер залишався у напіввідкритому положенні. Потім були

проведені експерименти із плавним збільшенням і зменшенням швидкості обертання вентиляторів, а також з повним відкриттям і закриттямшибера.

В ході симуляції можна змінити значення будь-якої змінної. Наприклад, в проєкті неможливо оцінити роботу вхідних сигналів контролера, оскільки вони активуються зовнішнім колом кінцевих вимикачів. Проте, це можна зробити власноруч. Для цього на сторінці DI (Digital Inputs), в таблиці входів контролера, в осередку поруч із змінною *xLimitRight* у стовбці “Prepared Value” виконується подвійний клік ЛКМ. В осередку з’явиться значення “TRUE”. Натисканням клавіші “F7” приймаються зміни.

В результаті змінна *xLimitRight* змінить своє значення з FALSE на TRUE.

Результат виконання такої операції показаний на рис. 4.28.

У вікні програми POU_Main в панелі виконується перехід на вкладку “Reverse” та натискається кнопка «вправо». Вхідний сигнал *xCmdFwd_ATV930* змінює своє значення на TRUE, проте на виході *cmdDrive* (блок POU_LIMIT) значення FALSE, чому також відповідає лінія чорного кольору, яка з’єднує порт *cmdDrive* з портом *i_xFwd* блоку *GIATV.Control_ATV*, що підтверджує безпомилковість створеного проєкту.

В реальній роботі це буде означати блокування команди подачі повітря при замкненому кінцевому вимикачі. Перевіряється коректність роботи інших елементів керування, індикаторів, регуляторів швидкості та стан вихідних портів контролера при активації кнопок на панелі.

На цьому етапі симуляції, який наведено на рис. 4.36, завершений.

У процесі тестування перевірялась реакція системи на аварійні ситуації, зокрема втрату сигналу з датчика положенняшибера та перевищення температури в зоні горіння. Усі сценарії успішно завершилися коректною реакцією системи: при виникненні аварійних ситуацій система автоматично переходила в безпечний режим, забезпечуючи зупинку вентиляторів і перекриття подачі газу.

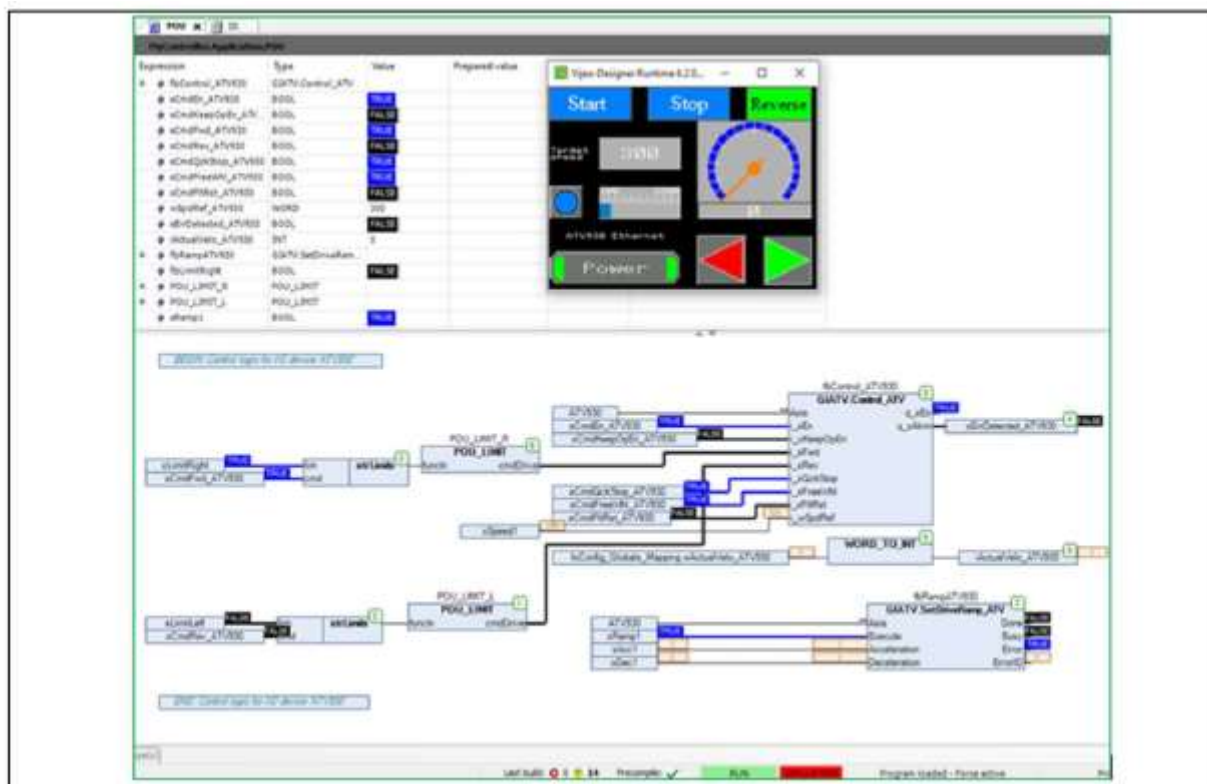


Рисунок 4.36 – Симуляція системи керування сервомотором шибера повітряозабірника

Результати симуляції підтвердили, що розроблена система керування приводами сушильного агрегату працює стабільно, забезпечує необхідний рівень точності регулювання і відповідає вимогам до безпеки та надійності.

4.6 Висновки до розділу 4

У цьому розділі було успішно виконано віртуальну симуляцію системи керування приводами сушильного агрегату із використанням програмного забезпечення Schneider Electric. У рамках роботи було створено проекти в SoMachine для керування контролером M241 і в Vijeo Designer для розробки інтерфейсу оператора на основі сенсорної панелі Magelis HMISTU855. Крім того, було реалізовано регулювання швидкості асинхронних двигунів через перетворювачі частоти ATV930 та ATV320, а також позиціонування шибера за допомогою PID-регулятора.

Важливим досягненням є інтеграція моделей двигунів, побудованих у середовищах Ansys RMxprt і Maxwell, у вигляді ROM-об'єктів у робочий простір Twin Builder, що дозволило підвищити точність віртуального експерименту. У процесі симуляції перевірено різні режими роботи, включаючи стандартні та аварійні сценарії, а також протестовано логіку аварійного захисту. Система стабільно підтримувала необхідні параметри, забезпечувала плавне регулювання швидкості та кутового положення компонентів, а також реагувала на зміну технологічних умов із мінімальними затримками.

Результати симуляції підтвердили працездатність розробленої системи автоматизації, її відповідність сучасним вимогам безпеки та точності регулювання. Таким чином, розроблені програмні моделі можуть бути успішно використані для подальшого впровадження системи на реальному обладнанні, що сприятиме оптимізації роботи газового пальника та підвищенню його енергоефективності.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі виконано комплексне дослідження системи керування сушильним агрегатом, яке включало аналіз існуючих підходів, теоретичне обґрунтування експлуатаційних режимів, імітаційне моделювання ключових процесів та реалізацію системи керування у програмних середовищах автоматизації.

Встановлено, що одним із ключових факторів забезпечення стабільної роботи сушильного агрегату із газовим пальником є інтеграція ефективних систем керування, які адаптуються до технологічних умов процесу. Зокрема, проаналізовано засоби керування режимами роботи пальників, включаючи регулятори витрати палива, повітря та параметрів полум'я.

Розроблено концепцію прототипу виробничої установки з газовим пальником, яка слугувала основою для подальшого моделювання та оптимізації.

Результати моделювання показали, що оптимальне співвідношення повітря і палива, необхідне для ефективного згоряння, становить 1:1, а максимальна температура полум'я досягає 1600 °С. Також сформульовано математичну модель системи електричного приводу, яка описує роботу вентиляторів,шибера повітрязабірника та інших компонентів.

Реалізовано метод оптимізації режимів роботи, який дозволив зменшити енергоспоживання приводів на 10-15% завдяки адаптивному регулюванню швидкості двигунів і положенняшибера.

Результати симуляції у Ansys Twin Builder підтвердили, що час стабілізації швидкості асинхронного двигуна у векторному режимі становить 0.3 секунди, а точність позиціонуванняшибера з використанням BLDC-двигуна досягла 1 градуса.

Віртуальне тестування у SoMachine та Vijeo Designer від Schneider Electric підтвердило стабільність роботи системи, зокрема, при моделюванні аварійних ситуацій, таких як перевищення температури чи втрата сигналу з

датчика положення шибера, система автоматично переходила у безпечний режим.

Досягненням роботи є створення інтегрованої багатофізичної моделі газового пальника, яка враховує взаємодію газодинамічних, електромеханічних і керуючих процесів.

У межах дисертаційного дослідження розроблено інтелектуальну систему оптимізації режимів роботи сушильного агрегату на основі генетичного алгоритму, інтегровану в структуру цифрової моделі технологічного процесу. Запропонований підхід забезпечує адаптивний багатокритеріальний вибір раціональних технологічних параметрів з урахуванням поточного стану сировини, енергетичних показників та конструктивних обмежень обладнання. За результатами імітаційного моделювання підтверджено здатність генетичного алгоритму до стійкої збіжності, автоматичного коригування параметрів у відповідь на зміну технологічних умов та формування енергоефективних режимів роботи.

У роботі вдалося знизити енергоспоживання системи на 12%, покращити точність регулювання позиції шибера та стабільність швидкості вентиляторів, а також забезпечити екологічні вимоги завдяки зниженню рівня NO_x до 30 ppm.

Отримані результати можуть бути використані для проєктування нових систем газових пальників, модернізації існуючих та їх інтеграції у сучасні автоматизовані комплекси.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Промислові дослідження та впровадження пальників часткового попереднього змішування на камерних термічних рециркуляційних печах [Електронний ресурс] / А. О. Чейлитко, С. В. Башлій, С. Є. Чижов // Збірник наукових праць Дніпровського державного технічного університету. Технічні науки. - 2022. - № 1. - С. 144-150. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Znpddtu_2022_1_19

2. Теплофізичні засади спалювання газу в мікрофакельних пальниках з циліндричними стабілізаторами полум'я. / Інститут технічної теплофізики НАН України. Н.М.Фіалко, В.Г. Прокопов, Ю.В. Шеренковський, М.В. Майсон, Н.О. Меранова, Н.П. Полозенко, О.Б. Тимощенко, С.О. Альошко, М.З. Абдулін / Інститут технічної теплофізики НАН України. / Миколаїв: СПД Румянцева Г.В., 2021. – 118 с. <https://ittf.kiev.ua/naukovi-pidrozdili/malo%D1%97-energetiki-me/osnovni-publikaci%D1%97-viddilume/>

3. Аналіз ефективності систем охолодження стабілізаторних пальникових пристроїв з направляючими дефлекторами [Електронний ресурс] / Н. М. Фіалко, В. Г. Прокопов, С. О. Альошко, Ю. В. Шеренковський, Н. О. Меранова, О. Б. Тимощенко, М. З. Абдулін, Л. С. Бутовський // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Теплоенергетика. Інженерія довкілля. Автоматизація. - 2013. - № 758. - С. 46-51. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/VNULPT_2013_758_9

4. Інститут газу Національної академії наук України. Енергозберігаючий спосіб випалу вапняку і газові пальники для його здійснення. 2023. [Електронний ресурс] Режим доступу: <https://gas-inst.org.ua/55-5-energozberigajuchij-sposib-vipalu-vapnjaku-i-gazovi-palniki-dlja-jogo-zdijsnennja>

5. Промгазопарат. Пальники промислові для спалювання коксового, доменного, біо, метано-повітряних сумішей, генераторного газу. 2022. [Електронний ресурс] Режим доступу: <https://www.pga.com.ua/product/81>

6. Газові промислові пальники - види, принцип роботи. Промгазопарат. [Електронний ресурс] Режим доступу: <https://analytic.ub.ua/27158-gazovi-promislovi-palniki--vidi-princip-roboti.html>

7. Дослідження впливу періодів переключення пальників на однорідність температурного поля скловарної печі [Електронний ресурс] / В. С. Цапар // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія : Механіко-технологічні системи та комплекси. - 2014. - № 60. - С. 138-144. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vcpimtck_2014_60_22

8. Технологія та пальник для спалювання біомаси як допоміжного палива в факельних котлоагрегатах [Електронний ресурс] / О. Ю. Майстренко, Н. І. Дунаєвська, Я. І. Засядько, Д. Л. Бондзик, Т. С. Щудло, В. Г. Вифатнюк // Наука та інновації. - 2012. - Т. 8, № 4. - С. 83-88. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/scinn_2012_8_4_12

9. Атмосферні пальники в газових малометражних котлах [Електронний ресурс] / О. М. Складенко, М. П. Сенчук, О. О. Вишегородська // Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання. - 2007. - Вип. 11. - С. 55-59. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/votp_2007_11_9

10. Дослідження сучасних атмосферних газових пальників різної модифікації в автономному котлі [Електронний ресурс] / О. М. Складенко, О. Є. Романов, О. О. Вишегородська // Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання. - 2007. - Вип. 11. - С. 60-66. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/votp_2007_11_10

11. Сорока Б.С., Горупа В.В. Сучасний стан та напрями удосконалення пальників побутових газових плит. Частина 1. Науково-технологічні засади ефективного використання палива та екологічно чистого спалювання газу в кухонних плитах // Енерготехнології та ресурсозбереження. 2017. №3. С. 3–19. <http://er.nau.edu.ua/handle/NAU/39661>

12. Колієнко А.Г. Конспект лекцій з курсу «Пальникові пристрої та обладнання». Полтава: Національний університет ім. Юрія Кондратюка, 2022. 90 с. <https://reposit.nupp.edu.ua/handle/PoltNTU/11684>

13. ДСТУ ISO 5172:2009 Устаткування для газового зварювання. Пальники для газового зварювання, різання і підігрівання. Технічні умови та методи випробовування (ISO 5172:2006, IDT).

https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=77048

14. Marchenko, G., & Makarenko, V. (2020). GAS BURNER DEVICES OF JET DIFFUSION TYPE AND JET BURNERS, CREATED BY TUBULAR TECHNOLOGY. Energy Technologies & Resource Saving, (3), 63-70.

<https://doi.org/10.33070/etars.3.2020.07>

15. Черноусенко О.Ю., Бутовський Л.С., Мороз О.С., Куник А.А., Хілімончук Д.І. Розробка та дослідження дифузійностабілізаторного пальника з нішею // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. 2023. №1-2 (13-14). С.

47–54. <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2023.01.08>

16. Врагов А. Теплообмінні процеси та обладнання хімічних і газонафтопереробних виробництв. Навчальний посібник. Київ: Видавництво "Аграрна освіта", 2011. 256 с. <https://www.yakaboo.ua/ua/teploobminni-procesi-ta-obladnannja-himichnih-i-gazonaftopererobnih-virobnictv.html>

17. Особливості горіння дифузійного газового факела в одиничному трубчастому паливоспалювальному модулі [Електронний ресурс] / Г. М. Любчик, Н. М. Фіалко, А. Реграгі, М. В. Майсон // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Теорія і практика будівництва. - 2013. -

№ 755. - С. 242-248. - Режим доступу:

http://nbuv.gov.ua/UJRN/VNULPTPB_2013_755_46

18. Raghavan V. Combustion Technology: Essentials of Flames and Burners. Springer, 2022. 206 p. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-74621-6>

19. British Gas. Combustion Engineering and Gas Utilisation. Routledge, 2014. 912 p. https://books.google.com/books/about/Combustion_Engineering_and_Gas_Utilisati.html?id=-Hp9AwAAQBAJ

20. Особливості аеродинаміки пальникових пристроїв з циліндричними стабілізаторами полум'я за наявності турбулізаторів потоку на їхніх зривних кромках [Електронний ресурс] / Н. М. Фіалко, Н. В. Майсон, О. Б. Тимощенко, Н. О. Меранова, Г. В. Іваненко, В. Л. Юрчук, М. В. Ганжа, М. І. Дончак, М. З. Абдулін // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія : Техніка та енергетика АПК. - 2016. - Вип. 252. - С. 52-61. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvnau_tech_2016_252_9

21. Класифікація пальників. [Електронний ресурс] Режим доступу: <https://iua.waykun.com/articles/klasifikacija-palnikov.php>

22. Промислові пальники: газові, дизельні, пелетні. [Електронний ресурс] Режим доступу: <https://www.italgaz.com.ua/ua/industrial-burner.html>

23. Пальники газомазутні типу ГМГм. [Електронний ресурс] Режим доступу: <https://promgorelki.com/ukr/promishlennye-gorelki/gazovie-gorelki/ggpa-12.0.php>

24. Пальник газовий прямоточний ГГПА-12.0. [Електронний ресурс] Режим доступу: <https://www.fakel.ua/ua/products/burners/138/157/?>

25. Газові пальники для промислових котлів СІВ UNIGAS. [Електронний ресурс] Режим доступу: <https://unigas.com.ua/>

26. Експериментальні дослідження температурного режиму в зоні горіння пальників з ешелонованими решітками стабілізаторів полум'я [Електронний ресурс] / Н. М. Фіалко, Л. С. Бутовський, Н. О. Меранова, К. В. Рокитько, О. О. Грановська, Н. М. Ольховська, Л. Я. Швецова // Науковий вісник НЛТУ України. - 2017. - Вип. 27(5). - С. 77-81. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvnltu_2017_27

27. Покращення екологічних показників котлоагрегатів КВГМ 100 шляхом модернізації пальникових пристроїв [Електронний ресурс] / М. З. Абдулін, Т. В. Шелешей, І. С. Беднарська, Ю. С. Будя, В. С. Юрчук // Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського.

Серія : Технічні науки. - 2022. - Т. 33(72), № 6. - С. 130-135. - Режим доступу:
[http://nbuv.gov.ua/UJRN/sntuts_2022_33\(72\)_6_24](http://nbuv.gov.ua/UJRN/sntuts_2022_33(72)_6_24)

28. О.М. Словіковський, Б.С. Левандовський, В.Є. Плюгін. Сучасні підходи для створення інтегрованих енергетичних систем із розподіленою генерацією. Матеріали IV Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених «Проблеми сучасної електроенергетики, електротехніки та електромеханіки у післявоєнному періоді», 24 листопада 2023 р С. 61-64.
<https://ojs.kname.edu.ua/index.php/area/article/view/3266>

29. О.М. Словіковський, Д.С. Харшев, В.Є. Плюгін. Аналіз технічних та економічних параметрів компонентів сонячної енергетичної системи. Матеріали IV Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених «Проблеми сучасної електроенергетики, електротехніки та електромеханіки у післявоєнному періоді», 24 листопада 2023 р С. 69-72.
<https://ojs.kname.edu.ua/index.php/area/article/view/3268>

30. ДСТУ EN 1643:2019 «Пристрої безпеки та керування газових пальників і газопальникових приладів. Система контролювання герметичності автоматичних запірних клапанів». Режим доступу:
https://budstandart.ua/normativ-document.html?id_doc=86929

31. ДСТУ EN 14459:2022 «Системи керування для газових пальників і газопальникових приладів електронні. Класифікування та методи оцінювання»/ Режим доступу: https://budstandart.ua/normativ-document.html?id_doc=111312

32. Тарахно О. В., Трегубов Д. Г., Жернокльов К. В., Коврегін В. В. Основні положення процесу горіння. Виникнення процесу горіння. Навчальний посібник/ Тарахно О. В., Трегубов Д. Г., Жернокльов К. В., Коврегін В. В. Х.: НУЦЗУ, 2020. – 408 с.
<http://repositsc.nuczu.edu.ua/bitstream/123456789/11382/1/%D0%9E%D1%81%D0%BD%D0%BE%D0%B2%D0%BD%D1%96%20%D0%BF%D0%BE%D0%>

[BB%D0%BE%D0%B6%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D1%8F%20%D0%BF%D1%80%D0%BE%D1%86%20%D0%B3%D0%BE%D1%80%20%D0%9D%D0%B0%D0%B2%D1%87_%D0%BF%D0%BE%D1%81%20%D0%BF%D1%80%D0%B0%D0%B2%D0%BA%D0%B0.pdf](#)

33. Гетта В. Г. Теплотехніка і теплові машини: Навчальний посібник. – Чернігів :2014., 397 с.

[file:///E:/Download/%D0%A2%D0%B5%D0%BF%D0%BB%D0%BE%D1%82%D0%B5%D1%85%D0%BD%D1%96%D0%BA%D0%B0%20%D1%96%20%D1%82%D0%B5%D0%BF%D0%BB%D0%BE%D0%B2%D1%96%20%D0%BC%D0%B0%D1%88%D0%B8%D0%BD%D0%B8%20.pdf](#)

34. С. А. Гольцман. Прилади контролю і автоматики теплових процесів. Вища школа. 2016 р.

35. Автоматика и автоматизация технологических процессов: Підручник / Т.Б. Головка, К.Г. Рего, Ю.О. Скрипник. - К.: Лебідь, 2017. http://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/Golovko_1997_232.pdf

36. Сучасні інформаційні технології, засоби автоматизації та електропривод : матеріали VIII Всеукраїнської науково-практичної конференції, 18–20 квітня 2024 р. / За заг. ред. О. Ф. Тарасова. – Краматорськ – Тернопіль: ДДМА, 2024. – 235 с. http://cit.dgma.donetsk.ua/materials/paper_citae_2024.pdf

37. V. Pliuhin, V. Korobka, A. Karyuk, M. Pan and M. Sukhonos, "Using Azure Machine Learning Studio with Python Scripts for Induction Motors Optimization Web-Deploy Project," 2019 IEEE International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications, Science and Technology (PIC S&T), Kyiv, Ukraine, 2019, pp. 631-634, <https://DOI.org/10.1109/PICST47496.2019.9061447>

38. Microsoft Azure Essentials: Azure Machine Learning. Access Mode: <https://download.microsoft.com/download/0/9/6/096170e9-23a2-4da6-89f5-7f5079cb53ab/9780735698178.pdf>

39. Data Science in the Cloud with Azure ML and R. Access Mode:
<http://azureinfo.microsoft.com/rs/microsoftdemandcenter/images/EN-CNTNT-eBook-DataScienceintheCloudwithMicrosoft.pdf/>
40. Shalloway A., Trott J. 2004. Design patterns explained: a new perspective on object-oriented design, Pearson education, 2004, 480.
https://books.google.com.ua/books/about/Design_Patterns_Explained.html?id=84Whswqz4rAC&redir_esc=y
41. M. Iacob, G. -D. Andreescu and N. Muntean, "SCADA system for a central heating and power plant," 2009 5th International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics, Timisoara, Romania, 2009, pp. 159-164, <https://doi.org/10.1109/SACI.2009.5136232>
42. Iman Morsi, Loay Mohy El-Din, SCADA system for oil refinery control, Measurement, Volume 47, 2014, Pages 5-13,
<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2013.08.032>
43. ДСТУ EN 1643:2019 «Пристрої безпеки та керування газових пальників і газопальникових приладів. Система контролювання герметичності автоматичних запірних клапанів». Режим доступу:
https://budstandart.ua/normativ-document.html?id_doc=86929
44. Газові прогресивні пальники з менеджером горіння Unigas Novanta R91A (2670 кВт). Режим доступу: <https://kotel.prom.ua/ua/p747998818-gazovye-progressivnye-gorelki.html>
45. Попович М.Г., Ковальчук О.В. Теорія автоматичного керування. Житомир: Житомирський державний технологічний університет, 2011. – 544 с. <https://learn.ztu.edu.ua/mod/resource/view.php?forceview=1&id=2709>
46. Корнієнко В. Теорія систем керування: підручник. Київ: Академія, 2015. – 497 с.
https://www.academia.edu/84786940/%D0%A2%D0%B5%D0%BE%D1%80%D1%96%D1%8F_%D1%81%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B5%D0%BC_%D0%BA%D0%B5%D1%80%D1%83%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D1

[%8F %D0%BF%D1%96%D0%B4%D1%80%D1%83%D1%87%D0%BD%D0%B8%D0%BA?](#)

47. Stephen F. Elston. Data Science in the Cloud with Azure ML and R. O'Reilly Media, Inc. 2015, 65 p. <https://www.oreilly.com/library/view/data-science-in/9781491917176/>

48. J. Barnes. Microsoft Azure Essentials: Azure Machine Learning, Microsoft, 2015, 240 p. <https://download.microsoft.com/download/0/9/6/096170e9-23a2-4da6-89f5-7f5079cb53ab/9780735698178.pdf>

49. Resch, M.M., Koller, B. (2021). The Role of Machine Learning and Artificial Intelligence in High Performance Computing. In: Resch, M.M., Wossough, M., Bez, W., Focht, E., Kobayashi, H. (eds) Sustained Simulation Performance 2019 and 2020. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-68049-7_11

50. Aksonov, O., Pliuhin, V., Tsegelnyk, Y., Slovikovskyi, O., Duniev, O., & Yehorov, A. (2022). Electric Drive SCADA Development with Vijeo Designer (Schneider Electric). Lighting Engineering & Power Engineering, 61(3), 107–121. <https://doi.org/10.33042/2079-424X.2022.61.3.04>

51. Писарець А., & Горжий І. (2023). Автоматизований комплекс вимірювання об'єму природного газу. Вісник Київського політехнічного інституту. Серія Приладобудування, (65(1), 117–122. [https://doi.org/10.20535/1970.65\(1\).2023.283466](https://doi.org/10.20535/1970.65(1).2023.283466)

52. Surnov, S., Bychkovskiy, I., Surnov, G., & Krasnov, S. (2019). Smart Monitoring: remote-monitoring technology of power, gas, and water consumption in Smart Cities. ArXiv, abs/1910.08759. <https://www.semanticscholar.org/paper/Smart-Monitoring%3A-remote-monitoring-technology-of-Surnov-Bychkovskiy/b716a46423281ee9980406ec19a41ea413191031>

53. Воропай О. В., Погасій С. С., Король О. Г., Мілевський С. В. Розробка механізмів безпеки scada-систем в постквантовий період. Системи

обробки інформації. 2022. № 2 (169). С. 25-34.
<https://doi.org/10.30748/soi.2022.169.03>.

54. Куцик А.С., Місюренко В.О. «Автоматизовані системи керування на програмованих логічних контролерах». Навчальний посібник. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2011. 200 с. <https://vlp.com.ua/node/8207>

55. M. A. Sehr et al., "Programmable Logic Controllers in the Context of Industry 4.0," in IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 17, no. 5, pp. 3523-3533, May 2021, <https://doi.org/10.1109/TII.2020.3007764>

56. Siemens, серія контролерів LMV. Режим доступу: <https://www.siemens.com/ua/uk/produkty/avtomatyzatsiya-ta-bezpeka-budivel/ustatkuvannya-dlya-system-ovk/vyrobnyky-komplektnoho-obladnannya-oem/rishennya-dlya-kotliv/systemy-upravlinnya-kotlamy.html>

57. Honeywell, інтелектуальні системи керування Eclipse RatioMatic. Режим доступу: <https://process.honeywell.com/us/en/products/thermal-solutions/burners-and-heat-exchangers/single-burners/ratiomatic>

58. Weishaupt, системи керування серії W-FM. Режим доступу: <https://pwm.com.ua/we600410>

59. Riello, модулі серії RS. Режим доступу: https://maxtechnology.com.ua/?gad_source=1&gclid=Cj0KCQiA_NC9BhCkARIsABSsnSTZtvr1kbz1ndvs5CtjZB2Va6mwGS6fjVnlfAw1HHjtypVrGR1_9LdwaAikXEALw_wcB

60. Maхon SMARTFIRE та інтеграція з сучасними SCADA-системами. Режим доступу: <https://process.honeywell.com/>

61. Modicon M241 Logic Controller Hardware Guide. Schneider Electric, 2018. – 250 р. Режим доступу: https://download.schneider-electric.com/files?p_Doc_Ref=EIO0000001456&p_enDocType=User+guide&p_File_Name=EIO0000001456.07.pdf

62. Modicon M241 Logic Controller Programming Guide. Schneider Electric, 2018. – 286 р. <https://download.schneider->

electric.com/files?p_Doc_Ref=EIO0000001432&p_enDocType=User+guide&p_File_Name=EIO0000001432.07.pdf

63. Material Handling Conveying M241 Project Template User Guide. Schneider Electric, 2014. – 44 p. https://download.schneider-electric.com/files?p_Doc_Ref=EIO0000001985&p_enDocType=System+user+guide&p_File_Name=EIO0000001985.00.pdf

64. SoMachine Industrial Ethernet User Guide. Schneider Electric, 2017. – 204 p. https://download.schneider-electric.com/files?p_Doc_Ref=EIO0000002215&p_enDocType=User+guide&p_File_Name=EIO0000002215.02.pdf

65. EcoStruxure™ Process Expert. Режим доступу: <https://www.se.com/ua/uk/product-range/65406-ecostruxure-process-expert/#overview>

66. Продукція Інтер-Бетон. Режим доступу: <https://inter-beton.ua/>

67. Технологія сухих будівельних сумішей. Навчальний посібник. Київ, КПП ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 38 с. <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/abf6ba17-08ea-4215-bb9e-86c18f86736e/content>

68. Сучасні композиційні будівельно-оздоблювальні матеріали // Захарченко П. В., Долгий Е. М., Гавриш О. М. та інші. – К.: КНУБА, 2005. 512 с.

69. В'язучі матеріали: Підручник / Р. Ф. Рунова, Л. Й. Дворкін, О. Л. Дворкін, Ю. Л. Носовський – К. : Основа, 2012. – 448 с.

70. Енергозберігаючий спосіб випалу вапняку і газові пальники для його здійснення / Інститут газу Національної академії наук України. – Режим доступу: <https://gas-inst.org.ua/55-5-energozberigajuchij-sposib-vipalu-vapnjaku-i-gazovi-palniki-dlja-jogo-zdijsnennja/>

71. Устаткування для виробництва цементу і вапна / BudTehnika. – Режим доступу: <https://budtehnika.pp.ua/773-ustatkuvannya-dlya-virobnictva-cementu-vapna.html>

72. CFD моделювання температурних режимів зони горіння пальників стабілізаторного типу з асиметричною подачею палива [Електронний ресурс] / Н. М. Фіалко, В. Г. Прокопов, Ю. В. Шеренковський, С. О. Альошко, Н. О. Меранова, К. В. Рокитько // Теплофізика та теплоенергетика. - 2019. - Т. 41, № 4. - С. 13-18. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/PTT_2019_41_4_3

73. Структура течії в пальникових пристроях з асиметричним паливорозподіленням для реагуючих потоків та ізотермічних умов [Електронний ресурс] / Н. М. Фіалко, В. Г. Прокопов, Ю. В. Шеренковський, С. О. Альошко, Н. О. Меранова, К. В. Рокитько // Теплофізика та теплоенергетика. - 2020. - Т. 42, № 1. - С. 19-26. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/PTT_2020_42_1_4

74. Моделювання турбулентних течій в мікрофакельних пальниках з циліндричними стабілізаторами полум'я за наявності прямокутних нішових порожнин [Електронний ресурс] / Н. М. Фіалко, Н. П. Полозенко, О. М. Кутняк, О. Б. Тимощенко, А. В. Кліщ, А. Реграгі, М. В. Ганжа // Міжнародний науковий журнал "Інтернаука" . - 2020. - № 12. - С. 43-48. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/mnj_2020_12_12

75. Індуктивне моделювання трубчастого газового нагрівача та пальника на пелетах [Електронний ресурс] / В. В. Ткачова, Р. В. Барсук // [Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Серия : Компьютерные системы и информационные технологии в образовании, науке и управлении.](#) - 2014. - Вып. 78. - С. 275-281. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/smmcs_2014_78_47

76. Закономірності течії в прямокутних кільцевих нішах циліндричних стабілізаторних пальників різної потужності [Електронний ресурс] / Н. М. Фіалко, М. В. Майсон, М. З. Абдулін, М. В. Ганжа, К. В. Рокитько, А. А. Озеров, Д. П. Хміль // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія : Техніка та енергетика АПК. - 2016. - Вип. 240. - С. 69-76. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvnau_tech_2016_240_9

77. Коваль О. Д., Яхно О. М. Прикладні питання механіки рідини і газу [Електронний ресурс] : навчальний посібник / НТУУ «КПІ». – Київ : НТУУ «КПІ», 2011. – Режим доступу: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/1503>

78. Макаренко Р. О., Коваль О. Д., Хлистун О. І. Гідрогазомеханіка [Електронний ресурс] : навчальний посібник / Національний авіаційний університет. – Київ : НАУ, 2016. – Режим доступу: <http://er.nau.edu.ua/handle/NAU/31910>

79. Лавренюк О.І., Баланюк В.М., Михалічко Б.М. Теорія горіння та вибуху: навчальний посібник. – Львів: ВРНВД ЛДУ БЖД, 2014. – 130 с. https://ldubgd.edu.ua/textbooks_and_manuals/teoriya-gorinnya-ta-vibuhu-navchalniy-posibnik-lavrenyuk-oi-balanyuk-vm

80. Turns S.R., Haworth D.C. An Introduction to Combustion: Concepts and Applications. – 4th ed. – New York: McGraw-Hill Education, 2021. – 732 p. <https://dokumen.pub/an-introduction-to-combustion-concepts-and-applications-3rd-ed-978-0-07-338019-3-0-07-338019-9.html>

81. Кузьмина Ю. С. Моделювання теплового стану приміщення з радіаційно-конвективними системами опалення : магістерська дис. : 144 Теплоенергетика / Кузьмина Юлія Сергіївна. – Київ, 2018. – 93 с. – Режим доступу: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/24686>

82. Бойчук Ю. В. Математичне моделювання кондуктивно-променевого теплообміну у теплоізоляційному покриві із врахуванням поверхневих радіаційних властивостей : дис. канд. техн. наук : 01.05.02 / Бойчук Юрій Володимирович. – Львів, 2020. – Режим доступу: <https://uacademic.info/ua/document/0420U101391>

83. Ansys Fluent Getting Started: Basics. Режим доступу: <https://www.ansys.com/training-center/course-catalog/fluids/ansys-fluent-getting-started-basics>

84. Mastering ANSYS CFD (Level 1) Complete Course. Режим доступу: <https://www.udemy.com/course/mastering-ansys-cfd/>

85. Грищенко В. М., Свіргун О. А., Калінін Є. І., Савченко В. Б. Основи ANSYS. Лабораторний практикум. – Харків: ХНТУСГ, 2020. – 168 с. <https://repo.btu.kharkov.ua/handle/123456789/8839>

86. Захарова Ю. В., Данилов М. Н., Вальгер С., Федорова Н. Н. Основи роботи в ANSYS 17. – Print2print, 2017. – 226 с. https://balka-book.com/ua/sistemyi_proektirovaniya_cad_cam-368/osnovyi_raboty_v_ansys_17-39578

87. Толочко О. І. Моделювання електромеханічних систем. Математичне моделювання систем асинхронного електроприводу: навчальний посібник. – Київ: НТУУ «КПІ», 2016. – 150 с. <https://epa.kpi.ua/science/publications/2016y/modelyuvannya-elektromehanichnih-sistem-matematichne-modelyuvannya-sistem-asinhronnogo-elektroprivodu-navchalnij-posibnik/>

88. Мірошніченко Г. А. Математичне моделювання процесів керування електроприводом: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 01.05.02. – Харків: ХНУРЕ, 2019. – 20 с. <https://openarchive.nure.ua/entities/publication/c33cf4b6-871d-4db9-af7a-5f348d0fa118>

89. Гладкий В. М. Математична модель асинхронного двигуна з урахуванням витіснення струму у стрижнях ротора. – Видавництво Львівської політехніки, 2016. <https://vlp.com.ua/node/16992>

90. Goolak, S., Gubarevych, O., Yermolenko, E., Slobodyanyuk, M., & Gorobchenko, O. (2020). Mathematical modeling of an induction motor for vehicles. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2(2 (104), 25–34. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.199559>

91. Petrenko, O., & Pliuhin, V. (2023). Design Methodology of a Multifunctional Screw-Type Energy Converter. Lighting Engineering & Power Engineering, 62(1), 28–36. <https://doi.org/10.33042/2079-424X.2023.62.1.05>

92. Pliuhin, V., Aksonov, O., Tsegelnyk, Y., Plankovsky, S., Kombarov, V., & Piddubna, L. (2021). Design and Simulation of a Servo-Drive Motor Using

ANSYS Electromagnetics. Lighting Engineering & Power Engineering, 60(3), 112–123. <https://doi.org/10.33042/2079-424X.2021.60.3.04>

93. Заблудський М.М. САПР електромеханічних пристроїв: навчальний посібник / М.М. Заблудський, В.Є. Плюгін, К. Бур. – Алчевськ, Ладос, 2013. – Ч. 2. – 320 с.

94. Васьковський Ю. М., Гайденок Ю. А., Коваленко М. А. Математичне моделювання електричних машин з постійними магнітами. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. – 200 с. <https://ela.kpi.ua/items/cfd0bd58-15e3-4707-982b-06feb0f7b61b>

95. Ткачук В. І., Жук В. І. Математичне моделювання електромеханічних процесів у вентильному двигуні постійного струму. – Електротехніка і Електромеханіка, 2014, №1, с. 34-36. <https://repository.kpi.kharkov.ua/items/c384324b-daa4-483c-aa1d-d7d63eb77797>

96. Горго Ю. П. Математичні методи оптимізації. Вказівки для виконання практичних завдань. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. – 25 с. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/71758>

97. Василенко Д. О. Математичні методи оптимізації. Практикум. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 38 с. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/57062>

98. Андруник В.А., Висоцька В.А., Пасічник В.В., Чирун Л.Б., Чирун Л.В. Чисельні методи в комп'ютерних науках. Том 2: Навчальний посібник. – Львів: «Новий Світ - 2000», 2018. – 805 с. <https://ism.lpnu.ua/en/node/461>

99. Giorla, D., Roccella, R., Frano, R.L., Sannazzaro, G.: EM zooming procedure in ANSYS Maxwell 3D. Fusion Engineering and Design 132, 67–72 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2018.04.096>

100. Allirani, S., Vidhya, H., Aishwarya, T., et al.: Design and performance analysis of switched reluctance motor using ANSYS Maxwell. In: 2018 2nd International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICOEI), pp. 1427–1432. IEEE, Tirunelveli (2018). <https://doi.org/10.1109/ICOEI.2018.8553912>

101. Tamara Gammaidoni, Jacopo Zembi, Michele Battistoni, Giulia Biscontini, Alessandro Mariani, CFD Analysis of an Electric Motor's Cooling System: Model Validation and Solutions for Optimization, Case Studies in Thermal Engineering, Volume 49, 2023, 103349, <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103349>
102. Lopes TD, Raizer A, Valente Júnior W. The Use of Digital Twins in Finite Element for the Study of Induction Motors Faults. Sensors. 2021; 21(23):7833. <https://doi.org/10.3390/s21237833>
103. Singh RR, Bhatti G, Kalel D, Vairavasundaram I, Alsaif F. Building a Digital Twin Powered Intelligent Predictive Maintenance System for Industrial AC Machines. Machines. 2023; 11(8):796. <https://doi.org/10.3390/machines11080796>
104. Pliuhin B., Zablodskiy M., Tsegelnyk Є., & Slovikovskyi O. (2022). Development of Imitation Model of an Electromechanical Energy Converter with a Solid Rotor in ANSYS RMxpert, Maxwell and Twin Builder . Lighting Engineering & Power Engineering, 61(1), 21–29. <https://doi.org/10.33042/2079-424X.2022.61.1.03>
105. Мілих В. І. Проектування трифазних асинхронних двигунів з короткозамкненою обмоткою ротора: навчальний посібник. – Харків: ФОП Панов А. М., 2023. – 112 с. <https://repository.kpi.kharkov.ua/items/b6d6be16-a12b-4bf6-93af-74c1464ebff5>
106. Протасов С. Ю., Ситник О. О., Ключка К. М. Методичні рекомендації до виконання курсового проєкту на тему «Проектування асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором» для здобувачів освітнього ступеня «бакалавр» зі спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка усіх форм навчання. – Черкаси: ЧДТУ, 2023. – 105 с. <https://elib.chdtu.edu.ua/e-books/5044>
107. Підручник з Python: Офіційна документація Python. [Електронний ресурс] Режим доступу: <https://docs.python.org/uk/3.11/tutorial/>
108. Martin Fitzpatrick. Create GUI Applications with Python & Qt5. Version 4.0. 670 p. <https://library.kre.dp.ua/Books/2-4%20kurs/%D0%9C%D0%BE%D0%B2%D0%B8%20%D0%BF%D1%80%D0%>

[BE%D0%B3%D1%80%D0%B0%D0%BC%D1%83%D0%B2%D0%B0%D0%B%D0%BD%D1%8F/Python/Create%20GUI%20Applications%20with%20Python%20and%20QT5_2020.pdf](#)

109. Герасименко В. А., Шпіка М. І. Моделювання тягового двигуна постійного струму в Ansys RMxprt. – Харків: Державний біотехнологічний університет, 2023. – С. 113-114.

<https://repo.btu.kharkov.ua/handle/123456789/43759>

110. Vladyslav Pliuhin, Mykola Zablodskiy, Maria Sukhonos, Yevgen Tsegelnyk and Lidiia Piddubna. Determination of Massive Rotary Electric Machines Parameters in ANSYS RMxprt and ANSYS Maxwell. STUE-2022 2023. Vol. 536. P. 189–201 https://doi.org/10.1007/978-3-031-20141-7_18

111. Pliuhin, V., Zablodskiy, M., Tsegelnyk, Y., & Slovikovskyi, O. (2022). Development of Imitation Model of an Electromechanical Energy Converter with a Solid Rotor in ANSYS RMxprt, Maxwell and Twin Builder . Lighting Engineering & Power Engineering, 61(1), 21–29. <https://doi.org/10.33042/2079-424X.2022.61.1.03>

112. V. Herasymenko, V. Pliuhin, V. Noskov, O. Zakovorotnyi, M. Mezentsev and T. Orlova, "Modeling of DC Traction Motor In Ansys RMXprt," 2023 IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek), Kharkiv, Ukraine, 2023, pp. 1-6, <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek61412.2023.10312886>

113. Pliuhin, V., Tsegelnyk, Y., Plankovskyy, S., Aksonov, O., Kombarov, V. (2023). Implementation of Induction Motor Speed and Torque Control System with Reduced Order Model in ANSYS Twin Builder. In: Cioboată, D.D. (eds) International Conference on Reliable Systems Engineering (ICoRSE) - 2023. ICoRSE 2023. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 762., Pp. 514-531. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-40628-7_42

114. Quintal-Palomo, R.E., Gwozdziwicz, M., Dybkowski, M.: Modelling and co-simulation of a permanent magnet synchronous generator. COMPEL – The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic

Engineering 38(6), 1904–1917 (2019). <https://doi.org/10.1108/COMPEL-12-2018-0501>

115. Zhang, G., Li, K., Liu, C.: Simulation of permanent magnet synchronous motor vector control system based on Simpler & Maxwell. In: 2018 7th International Conference on Energy, Environment and Sustainable Development (ICEESD 2018), pp. 1964–1969. Atlantis Press (2018). <https://doi.org/10.2991/iceesd-18.2018.349>

116. Pliuhin, V., Slovikovskyi, O., & Synelnykov, O. (2024). Formation the Robotic Mechanism Digital Twin Structure. Lighting Engineering & Power Engineering, 63(1), 27–34. <https://doi.org/10.33042/2079-424X.2024.63.1.04>

117. Pliuhin, V., Tsegelnyk, Y., & Slovikovskyi, O. (2024). Digital Twins of Different Types Electrical Machines. Lighting Engineering & Power Engineering, 63(2), 35–45. <https://doi.org/10.33042/2079-424X.2024.63.2.01>

118. Filizadeh, S.: Electric Machines and Drives: Principles, Control, Modeling, and Simulation. CRC Press, Boca Raton (2013). <https://doi.org/10.1201/9781315169651>

119. Veltman, A., Pulle, D.W.J., De Doncker, R.W.: Fundamentals of Electrical Drives. POWSYS. Springer, Cham (2016). <https://doi.org/10.1007/978-3-319-29409-4>

120. Худяєв О. А., Обруч І. В., Асмолова Л. В. Частотне керування асинхронним електроприводом: навчальний посібник. – Харків: Право, 2023. – 250 с. <https://repository.kpi.kharkov.ua/items/1ac1e5ef-b34d-4a70-8329-edef1bf0e57a>

121. V. Pliuhin, O. Petrenko, V. Grinina, O. Grinin, A. Ehorov. Imitation model of a high-speed induction motor with frequency control. Electrical engineering & electromechanics, 2017, no. 6, pp. 14-20. <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2017.6.02>

122. Fediv, Y., & Sivakova, O. (2022). Determining the mode characteristics of voltage regulator with capacitive load . Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 3(5 (117), 28–35. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.259935>

123. Bindeshwar Singh, Garima Agrawal, Enhancement of voltage profile by incorporation of SVC in power system networks by using optimal load flow method in MATLAB/Simulink environments, Energy Reports, Volume 4, 2018, Pages 418-434. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2018.07.004>

124. Calle-Prado, A., Alepuz, S., Bordonau, J., et al.: Predictive control of a back-to-back NPC converter-based wind power system. IEEE Transactions on Industrial Electronics 63(7), 4615–4627 (2016). <https://doi.org/10.1109/TIE.2016.2529564>

125. Boldea, I., & Nasar, S. A. (1992). Vector Control of AC Drives. CRC Press. 1992 – 250 p. <https://www.routledge.com/Vector-Control-of-AC-Drives/Boldea-Nasar/p/book/9780849344084>

126. Chiasson, J. (2005). Modeling and High-Performance Control of Electric Machines. Wiley-IEEE Press. 2005. – 722 p. <https://doi.org/10.1002/0471722359>

127. Xiao Han, Xing Liu, Wei Wu, Bingzheng Wang, Research on the Control Method of Stepper Motor for the Trajectory Correction Mechanism of the Diversion Trench, 2023 7th International Conference on Electrical, Mechanical and Computer Engineering (ICEMCE), Pp. 343-348. <https://doi.org/10.1109/ICEMCE60359.2023.10490964>

128. Шульга О. В. Автоматизоване керування електроприводами: навчальний посібник. – Полтава: ПолтНТУ, 2007. – 293 с. <https://elib.chdtu.edu.ua/e-books/4902>

129. О.М. Словіковський, Жилін А.В., Плюгін В.Є. Розробка системи стабілізації швидкості генератора електростанції при коливанні навантаження / А.В. Жилін, В.Є. Плюгін // Тези доповідей III Всеукраїнської наук.-практ. конф. «Проблеми сучасної електроенергетики, електротехніки та електромеханіки у післявоєнному періоді», 19-21 жовтня 2022 р. – Харків: ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2022, С. 16-17. <https://ojs.kname.edu.ua/index.php/area/article/view/2988>

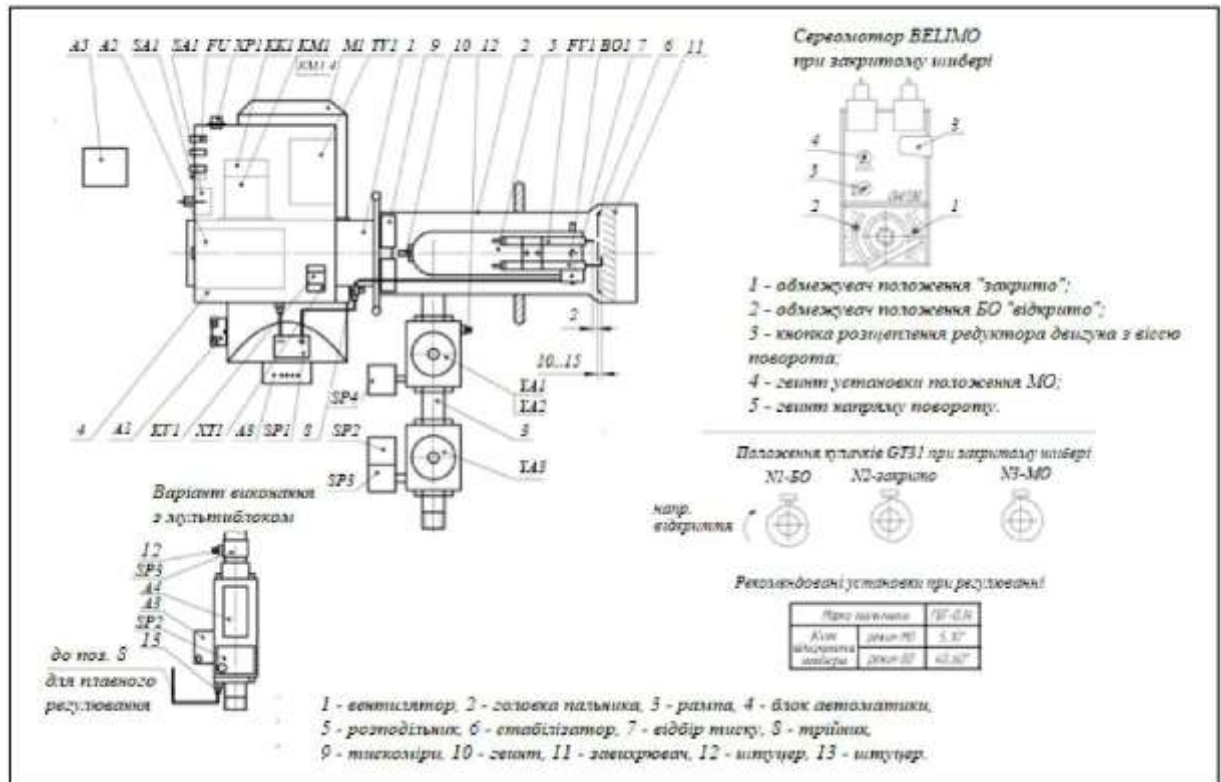
130. Trzynadlowski, A.M.: The Field Orientation Principle in Control of Induction Motors. PEPS. Springer, Boston, MA (1994). <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-2730-5>
131. Yu, J., Zhang, T., Qian, J.: Modern control methods for the induction motor. In: Electrical Motor Products, pp. 147–172. Woodhead Publishing, Cambridge (2011). <https://doi.org/10.1533/9780857093813.147>
132. Kiran, N.: Indirect vector control of three phase induction motor using PSIM. Bulletin of Electrical Engineering and Informatics 3(1), 15–24 (2014). <https://doi.org/10.11591/eei.v3i1.181>
133. Tsai, M.F., Tseng, C.S., Lin, B.Y.: Phase voltage-oriented control of a PMSG wind genera-tor for unity power factor correction. Energies 13(21), 5693 (2020). <https://doi.org/10.3390/en13215693>
134. Баховець Б. О. Автоматизований електропривод: навчальний посібник. – Рівне: НУВГП, 2010. – 238 с. <https://elib.chdtu.edu.ua/e-books/4903>
135. Панчук С. А., Стаценко В. В. Система керування двигуном постійного струму з постійними магнітами. // Технології та дизайн. – 2017. – №3 (24). <https://er.knutd.edu.ua/handle/123456789/7888>
136. ATV930-ATV950 Installation manual. Schneider Electric, 2023. – 244 p. https://download.schneider-electric.com/files?p_Doc_Ref=NHA80932&p_enDocType=User+guide&p_File_Name=ATV930_950_Installation_manual_EN_NHA80932_10.pdf
137. Sukhonos, M., Pliuhin, V., Tsegelnyk, Y., Slovikovskyi, O., & Varvianska, V. (2022). Development of Electric Drive Control System in SoMachine (Schneider Electric) . Lighting Engineering & Power Engineering, 61(3), 93–106. <https://doi.org/10.33042/2079-424X.2022.61.3.03>
138. Pliuhin, V., Sukhonos, M., Slovikovskyi, O., Dolzhenko, I. (2026). AI-Powered Robotic Mechanisms for Handling Radioactive Materials. In: Arsenyeva, O., Romanova, T., Sukhonos, M., Biletskyi, I., Tsegelnyk, Y. (eds) Smart Technologies in Urban Engineering. STUE 2024. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 1659. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-032-06832-3_21

139. SoMachine Industrial Ethernet User Guide. Schneider Electric, 2017. – 204 p. https://download.schneider-electric.com/files?p_Doc_Ref=EIO0000002215&p_enDocType=User+guide&p_File_Name=EIO0000002215.02.pdf
140. Vijeo Designer Tutorial. Schneider Electric, 2014. – 70 p. https://download.schneider-electric.com/files?p_Doc_Ref=VD-userguide-V6.2&p_enDocType=User+guide&p_File_Name=Vijeo-Designer-Starting-guide-English.pdf
141. Vijeo Designer (Schneider Electric). Menu Commands Online Help. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://product-help.schneider-electric.com/Machine%20Expert/V2.2/en/SoMMenu/SoMMenu/D-SE-0084062.html>

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

КОНСТРУКЦІЯ ПАЛЬНИКА



ДОДАТОК Б

СХЕМИ ЕЛЕКТРИЧНІ ПРИНЦИПОВІ

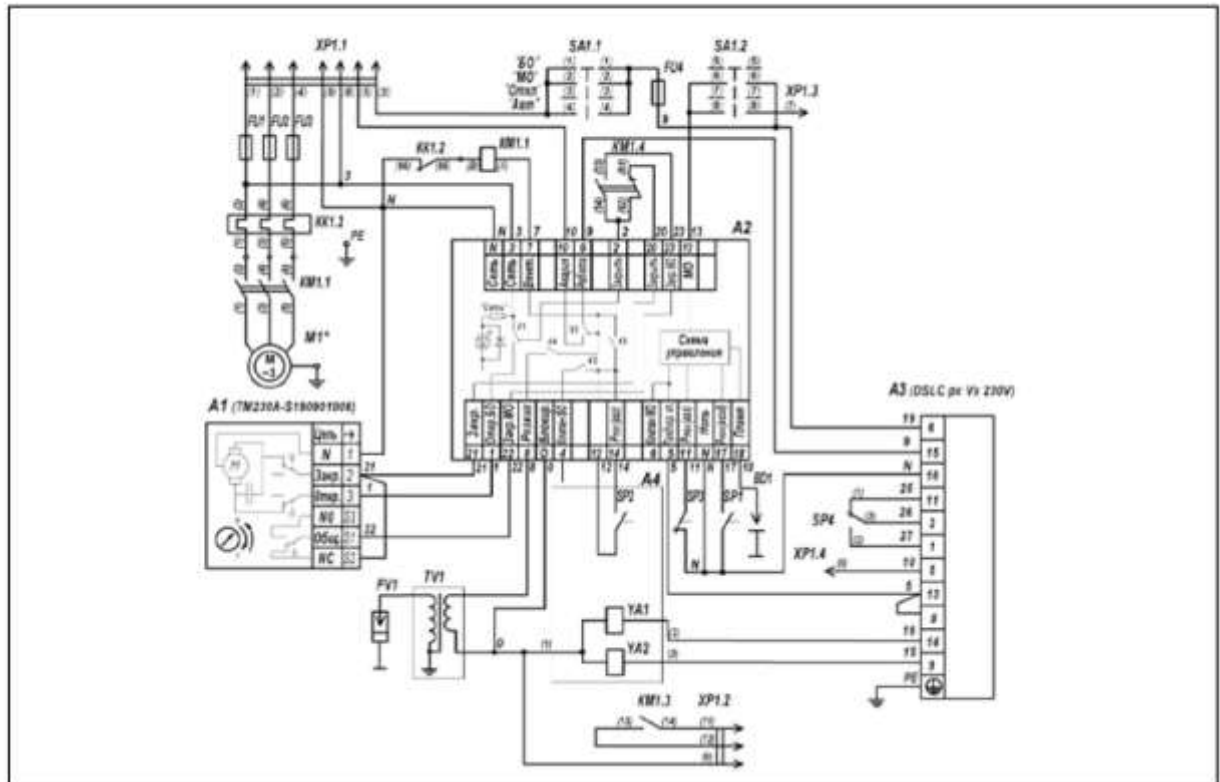


Рисунок Б.1 – Схема електрична принципова пальника блочного газового ГБГ-0,34

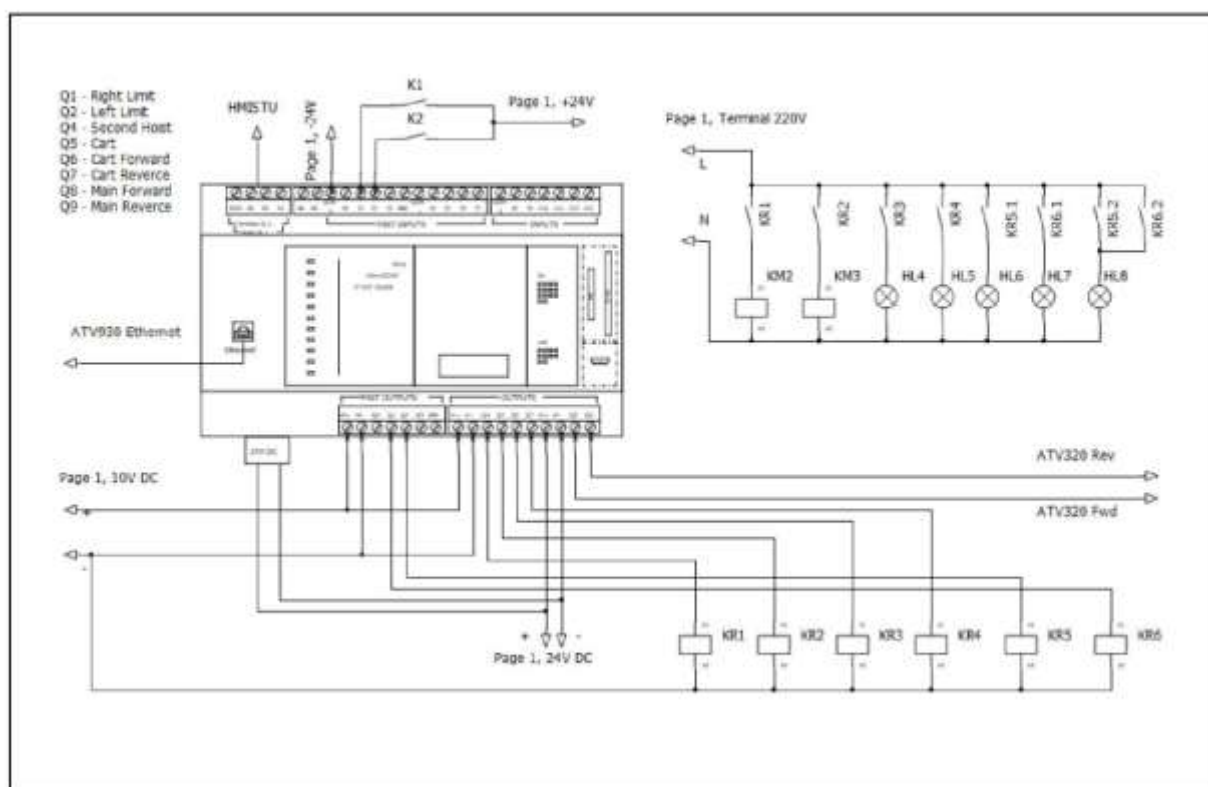


Рисунок Б.2 – Схема електрична принципова контролера та кола керування

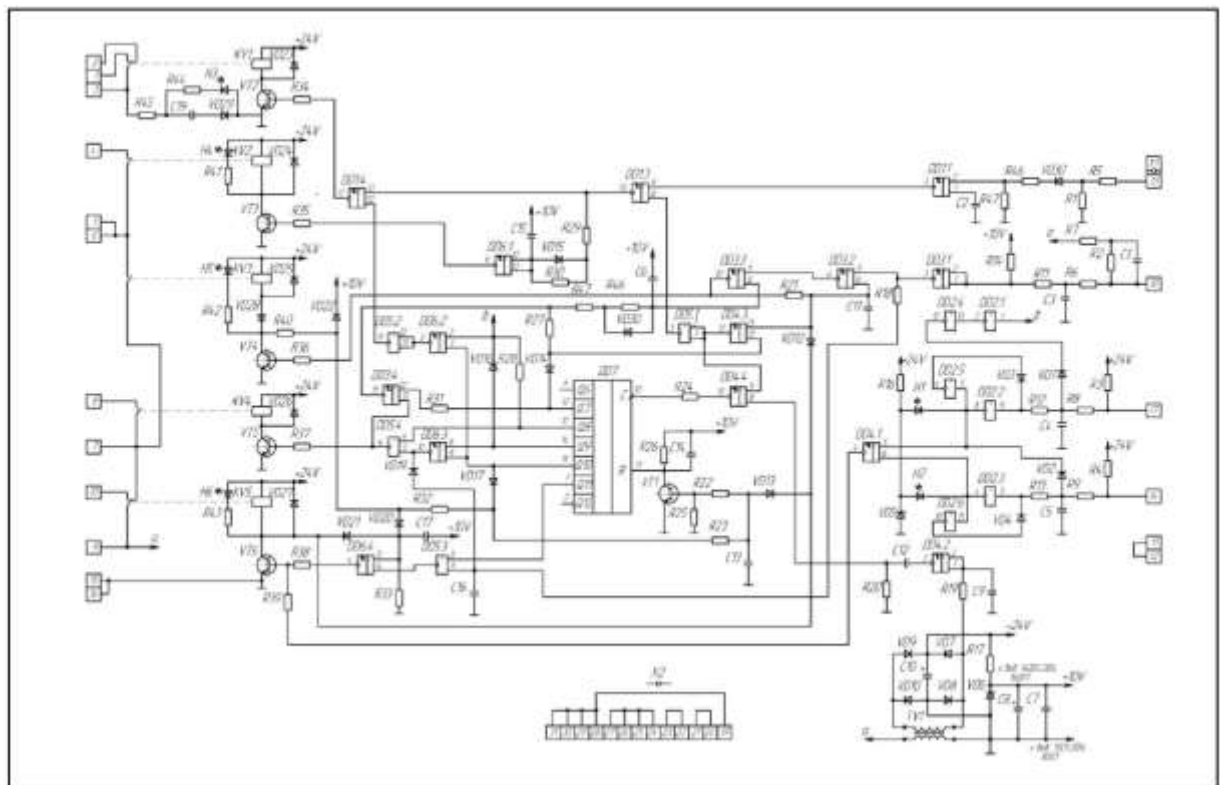


Рисунок Б.3 – Схема електрична принципова блока керування ГБГ-0,34

ДОДАТОК Г

ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ РОЗРАХУНКІВ

Лістинг Г.1. Розрахунок параметрів асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором

% Розрахунок параметрів асинхронного двигуна

% Вихідні дані

```

Pn = 750;
Un = 380;
Unf = Un / sqrt(3);
n = 1450;
p = 2;
J2 = 0.0016;
F = 0.002;
cosFi = 0.73;
In = 2;
kpd = 0.72;
Is = 9;
Mn = 3.82;
Ms = 7.26;
Mm = 8.79;
ki = Is / In;
ks = Ms / Mn;
f1 = 50;
w1 = 2*pi*f1;
n1 = 60*f1/p;
% Розрахунок параметрів
sn = (n1 - n) / n;
sm = sn * (km + sqrt(km^2 - 1));
r2 = 1.02*Pn*ks*(3*(1 - sn)*ki^2*In^2);
k = 1.3;
c1 = 1.05;
r1 = k*Un^2*(1-sn)/(2.04*c1*Pn*ks*(1+c1/sm));
zk = Un/(sqrt(3)*ki*In);
xk = sqrt(zk^2 - (r1+r2)^2);
%xk = sqrt((r2/sm)^2 - r1^2);
x1 = 0.45*xk;
x2 = 0.55*xk;
sinFi = sqrt(1-cosFi^2);
I0 = In*(sinFi - cosFi*sn/sm);
z0 = Un/(sqrt(3)*I0);
x0 = sqrt(z0^2 - r1^2);
xm = x0 - x1;
M12 = xm/w1;
Ls1 = x1/w1;
Lr1 = x2/w1;

```

```
% параметри розбігу  
start_time = 1;  
work_time = 1;  
stop_time = 1;  
speed = 1000;  
tstop = start_time + work_time;  
ramp1 = speed/start_time;  
ramp2 = -speed/stop_time;
```

Лістинг Г.2. Розрахунок двигуна постійного струму для приводу шибера повітрозабірника

```
% Модель двигуна постійного струму для приводу шибера повітрозабірника
clear; clc; close all;
% === Початкові дані ===
Ra = 1.2; % Опір обмотки якоря, Ом
La = 0.01; % Індуктивність обмотки якоря, Гн
Ke = 0.02; % Постійна ЕРС, В/(рад/с)
Km = 0.02; % Постійна моменту, Нм/А
J = 0.01; % Момент інерції ротора, кг·м^2
B = 0.001; % Коефіцієнт в'язкого тертя, Нм·с/рад
V = 24; % Напруга живлення двигуна, В

% === Початкові умови ===
Ia0 = 0; % Початковий струм якоря, А
omega0 = 0; % Початкова кутова швидкість, рад/с
tspan = [0 2]; % Час моделювання, сек

% === Диференційні рівняння ===
% Визначення динамічної системи
motorModel = @(t, x) [
    (V - Ra * x(1) - Ke * x(2)) / La; % Електрична частина
    (Km * x(1) - B * x(2)) / J; % Механічна частина
];

% === Чисельне інтегрування ===
% Початкові умови [Ia0, omega0]
x0 = [Ia0; omega0];
[t, x] = ode45(motorModel, tspan, x0);

% === Вивід результатів ===
Ia = x(:, 1); % Струм якоря
omega = x(:, 2); % Кутова швидкість

figure;
subplot(2, 1, 1);
plot(t, Ia, 'LineWidth', 2);
grid on;
xlabel('Час, с');
ylabel('Струм якоря, А');
title('Динаміка струму якоря двигуна');
subplot(2, 1, 2);
plot(t, omega, 'LineWidth', 2);
grid on;
xlabel('Час, с');
ylabel('Кутова швидкість, рад/с');
title('Динаміка кутової швидкості двигуна');
```

Лістинг Г.3. Розрахунок приводу шибера повітрязабірника

% Модель приводу шибера повітрязабірника з фазами відкриття та закриття

```
clear; clc; close all;
```

% === Початкові дані ===

```
J_sh = 0.02; % Момент інерції шибера, кг·м^2
```

```
B_sh = 0.002; % Коефіцієнт в'язкого тертя, Нм·с/рад
```

```
K_sh = 10; % Жорсткість приводу шибера, Нм/рад
```

% === Параметри двигуна ===

```
Ra = 1.2; % Опір обмотки якоря, Ом
```

```
La = 0.01; % Індуктивність обмотки якоря, Гн
```

```
Ke = 0.02; % Постійна ЕРС, В/(рад/с)
```

```
Km = 0.02; % Постійна моменту, Нм/А
```

```
J_motor = 0.01; % Момент інерції двигуна, кг·м^2
```

% === Параметри системи ===

```
J_total = J_motor + J_sh; % Сумарний момент інерції
```

```
B_total = B_sh + 0.001; % Сумарне тертя
```

% === Початкові умови ===

```
Ia0 = 0; % Початковий струм якоря, А
```

```
omega0 = 0; % Початкова кутова швидкість, рад/с
```

```
theta0 = 0; % Початковий кут відкриття шибера, рад
```

```
tspan = [0 3]; % Час моделювання, сек
```

% === Функція сигналу керування (u0 залежить від часу) ===

```
u0_function = @(t) (t < 1) * 0 + (t >= 1 & t < 2) * 1 + (t >= 2) * 0;
```

% Закритий, відкритий, закритий

% === Диференційні рівняння ===

% Визначення динамічної системи

```
shutterModel = @(t, x) [
```

```
    (u0_function(t) * 24 - Ra * x(1) - Ke * x(2)) / La; % Електрична
```

частина

```
    (Km * x(1) - B_total * x(2) - K_sh * x(3)) / J_total; % Механічна
```

частина

```
    x(2) % Кутова швидкість для кута відкриття
```

```
];
```

% === Чисельне інтегрування ===

```
% Початкові умови [Ia0, omega0, theta0]
```

```
x0 = [Ia0; omega0; theta0];
```

```
[t, x] = ode45(shutterModel, tspan, x0);
```

% === Вивід результатів ===

```
Ia = x(:, 1); % Струм якоря
```

```
omega = x(:, 2); % Кутова швидкість
theta = x(:, 3); % Кут відкриття шибера
```

```
figure;
```

```
% Графік струму якоря
```

```
subplot(3, 1, 1);
plot(t, Ia, 'LineWidth', 2);
grid on;
xlabel('Час, с');
ylabel('Струм якоря, А');
title('Динаміка струму двигуна');
```

```
% Графік кутової швидкості
```

```
subplot(3, 1, 2);
plot(t, omega, 'LineWidth', 2);
grid on;
xlabel('Час, с');
ylabel('Кутова швидкість, рад/с');
title('Динаміка кутової швидкості');
```

```
% Графік кута відкриття шибера
```

```
subplot(3, 1, 3);
plot(t, theta, 'LineWidth', 2);
grid on;
xlabel('Час, с');
ylabel('Кут відкриття шибера, рад');
title('Динаміка відкриття шибера');
```

Лістинг Г.4. Оптимізація газового пальника

```
% Програма для оптимізації режимів роботи газового пальника
% Задані початкові дані, критерій оптимальності J, алгоритм
оптимізації
% і графічний вивід результатів.

clear; clc; close all;

% === Початкові дані параметрів газового пальника ===
Q_gas = 10; % Початкова витрата газу, кг/год
Q_air = 100; % Початковий об'єм повітря, м^3/год
x_sh = 0.5; % Початкове положення шиберу (0 - закритий, 1 - повністю
відкритий)
n_fan = 1500; % Початкова швидкість обертання вентилятора, об/хв

% Константи
alpha = 1.1; % Коефіцієнт надлишку повітря
H_u = 35; % Нижча теплота згоряння палива, МДж/кг
eta_max = 0.98; % Максимальна ефективність згоряння
P_fan = 0.5; % Споживана потужність вентилятора, кВт

% === Оптимізація ===
% Кількість ітерацій
max_iter = 50;

% Початковий критерій оптимальності
J = zeros(max_iter, 1);

% Початкові вагові коефіцієнти
w1 = 1; % Важливість ефективності
w2 = 0.5; % Важливість мінімізації NOx
w3 = 0.5; % Важливість мінімізації CO
w4 = 0.2; % Важливість енергоспоживання

% Ітераційний процес
for k = 1:max_iter
    % === Розрахунок параметрів на кожній ітерації ===
    % Витрата повітря з урахуванням надлишку повітря
    Q_air = alpha * Q_gas;

    % Ефективність згоряння
    eta = eta_max * exp(-0.1 * abs(alpha - 1)); % Ефективність
    залежить від надлишку повітря

    % Викиди NOx та CO
    E_NOx = 20 * (alpha - 1)^2; % Пропорційні до надлишку повітря
    E_CO = 100 * exp(-alpha); % Зменшуються із зростанням повітря

    % Енергоспоживання
```

```

P_drive = P_fan * (n_fan / 1500)^2; % Потужність вентилятора
залежить від швидкості

% === Розрахунок критерію оптимальності ===
J(k) = w1 * eta - w2 * E_NOx - w3 * E_CO - w4 * P_drive;

% === Оновлення параметрів (градієнтний спуск) ===
% Зміна параметрів для оптимізації
dQ_gas = -0.01 * (w1 * exp(-0.1 * abs(alpha - 1)) - w2 * 40 *
(alpha - 1)); % Градієнт по Q_gas
Q_gas = Q_gas + dQ_gas;

dAlpha = -0.01 * ((eta - 0.9) + 2 * w2 * (alpha - 1)); % Градієнт
по alpha
alpha = alpha + dAlpha;

% Обмеження параметрів
Q_gas = max(5, min(15, Q_gas)); % Витрата газу обмежена 5-15
кг/год
alpha = max(0.8, min(1.2, alpha)); % Надлишок повітря обмежений
0.8-1.2
end

% === Графік оптимізації ===
figure;
plot(1:max_iter, J, 'LineWidth', 2, 'Color', 'b');
grid on;
xlabel('Номер ітерації');
ylabel('Критерій оптимальності J');
title('Оптимізація режимів роботи газового пальника');
legend('Критерій J', 'Location', 'best');

% === Вивід результатів ===
fprintf('Оптимізація завершена\n');
fprintf('Оптимальні параметри:\n');
fprintf('  Витрата газу Q_gas: %.2f кг/год\n', Q_gas);
fprintf('  Коефіцієнт надлишку повітря alpha: %.2f\n', alpha);
fprintf('  Ефективність згоряння eta: %.2f%%\n', eta * 100);
fprintf('  Викиди NOx: %.2f ppm\n', E_NOx);
fprintf('  Викиди CO: %.2f ppm\n', E_CO);
fprintf('  Енергоспоживання P_drive: %.2f кВт\n', P_drive);

```

Лістинг Г.5. Програма проєктування асинхронного двигуна на Python

```
# Induction Motor
from enum import Enum, IntEnum
import math
from scipy.interpolate import CubicSpline

from Rotor import Rotor
from Stator import Stator
from config import load_file, ConnectionType, msgDialog, Status

class Motor:

    def __init__(self):
        self.stator = Stator()
        self.rotor = Rotor()
        self.UL = 0
        self.UF = 0
        self.fl = 0
        self.n1 = 0
        self.Pn = 0
        self.P1 = 0
        self.T = 0
        self.p = 0
        self.dp = 0
        self.omega = 0
        self.kf = 0
        self.h = 0
        self.h_list = (56, 63, 71, 80, 90, 100, 112, 132, 160, 180, 200, 225,
250, 280, 315, 355)
        self.h_min = 0
        self.h_max = 0
        self.kE = 0
        self.kB = 1.11
        self.kpd = 0
        self.cosFi = 0
        self.A = 0
        self.A_min = 0
        self.A_max = 0
        self.Bd = 0
        self.Bd_min = 0
        self.Bd_max = 0
        self.Iln = 0
        self.Fi = 0.0
        self.AJ1 = 0.0
        self.dAJ = 0.0
        self.index_h = 0
        self.Fd = 0.0
        self.kd = 0.0
        self.kz = 0.0
        self.F_sum = 0.0
        self.k_mu = 0.0
        self.I_mu = 0.0
        self.I_mu_rel = 0.0

    # Page 0: Power Supply
    def init_power_supply(self):
        if self.stator.connection == ConnectionType.STAR:
            self.UF = round(self.UL/math.sqrt(3))
        else:
```

```

        self.UF = self.UL

# Page 1: Rated Data
def init_rated_data(self):
    self.p = round(60.0 * self.fl / self.n1)
    self.dp = 2 * self.p
    self.omega = math.pi * self.n1 / 30.0
    self.kf = 4.0 / math.pi

# Page 2: Stator
def init_stator(self):
    if self.dp == 2:
        # shaft height
        # h_min
        arg = load_file("h_P2_arg_2p.dat")
        func = load_file("h_P2_2p1.dat")
        cs = CubicSpline(arg, func)
        self.h_min = cs(self.Pn*0.001)*0.001
        # h_max
        func = load_file("h_P2_2p2.dat")
        cs = CubicSpline(arg, func)
        self.h_max = cs(self.Pn*0.001)*0.001
        # Efficiency
        arg = load_file("kpd_P2_arg_2p.dat")
        func = load_file("kpd_P2_2p.dat")
        cs = CubicSpline(arg, func)
        self.kpd = cs(self.Pn*0.001)
        # Power Factor
        arg = load_file("cos_P2_arg_2p.dat")
        func = load_file("cos_P2_2p.dat")
        cs = CubicSpline(arg, func)
        self.cosFi = cs(self.Pn*0.001)
        self.stator.kD_min = 0.52
        self.stator.kD_max = 0.57
    if self.dp == 4:
        # shaft height
        # h_min
        arg = load_file("h_P2_arg_4p.dat")
        func = load_file("h_P2_4p1.dat")
        cs = CubicSpline(arg, func)
        self.h_min = cs(self.Pn*0.001)*0.001
        # h_max
        func = load_file("h_P2_4p2.dat")
        cs = CubicSpline(arg, func)
        self.h_max = cs(self.Pn*0.001)*0.001
        # Efficiency
        arg = load_file("kpd_P2_arg_4p.dat")
        func = load_file("kpd_P2_4p.dat")
        cs = CubicSpline(arg, func)
        self.kpd = cs(self.Pn*0.001)
        # Power Factor
        arg = load_file("cos_P2_arg_4p.dat")
        func = load_file("cos_P2_4p.dat")
        cs = CubicSpline(arg, func)
        self.cosFi = cs(self.Pn*0.001)
        self.stator.kD_min = 0.64
        self.stator.kD_max = 0.68
    if self.dp == 6:
        # shaft height
        # h_min
        arg = load_file("h_P2_arg_6p.dat")
        func = load_file("h_P2_6p1.dat")
        cs = CubicSpline(arg, func)

```

```

self.h_min = cs(self.Pn*0.001)*0.001
# h_max
func = load_file("h_P2_6p2.dat")
cs = CubicSpline(arg, func)
self.h_max = cs(self.Pn*0.001)*0.001
# Efficiency
arg = load_file("kpd_P2_arg_6p.dat")
func = load_file("kpd_P2_6p.dat")
cs = CubicSpline(arg, func)
self.kpd = cs(self.Pn*0.001)
# Power Factor
arg = load_file("cos_P2_arg_6p.dat")
func = load_file("cos_P2_6p.dat")
cs = CubicSpline(arg, func)
self.cosFi = cs(self.Pn*0.001)
self.stator.kD_min = 0.7
self.stator.kD_max = 0.72
if self.dp == 8:
    # shaft height
    # h_min
    arg = load_file("h_P2_arg_8p.dat")
    func = load_file("h_P2_8p1.dat")
    cs = CubicSpline(arg, func)
    self.h_min = cs(self.Pn*0.001)*0.001
    # h_max
    func = load_file("h_P2_8p2.dat")
    cs = CubicSpline(arg, func)
    self.h_max = cs(self.Pn*0.001)*0.001
    # Efficiency
    arg = load_file("kpd_P2_arg_8p.dat")
    func = load_file("kpd_P2_8p.dat")
    cs = CubicSpline(arg, func)
    self.kpd = cs(self.Pn*0.001)
    # Power Factor
    arg = load_file("cos_P2_arg_8p.dat")
    func = load_file("cos_P2_8p.dat")
    cs = CubicSpline(arg, func)
    self.cosFi = cs(self.Pn*0.001)
    self.stator.kD_min = 0.74
    self.stator.kD_max = 0.77
if self.dp == 10:
    # shaft height
    # h_min
    arg = load_file("h_P2_arg_10p.dat")
    func = load_file("h_P2_10p1.dat")
    cs = CubicSpline(arg, func)
    self.h_min = cs(self.Pn*0.001)*0.001
    # h_max
    func = load_file("h_P2_10p2.dat")
    cs = CubicSpline(arg, func)
    self.h_max = cs(self.Pn*0.001)*0.001
    # Efficiency
    arg = load_file("kpd_P2_arg_10p.dat")
    func = load_file("kpd_P2_10p.dat")
    cs = CubicSpline(arg, func)
    self.kpd = cs(self.Pn*0.001)
    # Power Factor
    arg = load_file("cos_P2_arg_10p.dat")
    func = load_file("cos_P2_10p.dat")
    cs = CubicSpline(arg, func)
    self.cosFi = cs(self.Pn*0.001)
    self.stator.kD_min = 0.74
    self.stator.kD_max = 0.77

```

```

if self.dp == 12:
    # shaft height
    # h_min
    arg = load_file("h_P2_arg_12p.dat")
    func = load_file("h_P2_12p1.dat")
    cs = CubicSpline(arg, func)
    self.h_min = cs(self.Pn*0.001)*0.001
    # h_max
    func = load_file("h_P2_12p2.dat")
    cs = CubicSpline(arg, func)
    self.h_max = cs(self.Pn*0.001)*0.001
    # Efficiency
    arg = load_file("kpd_P2_arg_12p.dat")
    func = load_file("kpd_P2_12p.dat")
    cs = CubicSpline(arg, func)
    self.kpd = cs(self.Pn*0.001)
    # Power Factor
    arg = load_file("cos_P2_arg_12p.dat")
    func = load_file("cos_P2_12p.dat")
    cs = CubicSpline(arg, func)
    self.cosFi = cs(self.Pn*0.001)
    self.stator.kD_min = 0.74
    self.stator.kD_max = 0.77

def select_main_limits(self, index):
    self.h = self.h_list[index]*0.001
    self.stator.select_main_limits(index)
    if self.dp == 2:
        # A_min
        arg = load_file("A_Da_arg_2p.dat")
        func = load_file("A_Da_2p1.dat")
        cs = CubicSpline(arg, func)
        self.A_min = cs(self.stator.Da*1000.0)*1000.0
        # A_max
        func = load_file("A_Da_2p2.dat")
        cs = CubicSpline(arg, func)
        self.A_max = cs(self.stator.Da*1000.0)*1000.0
        # Bd_min
        arg = load_file("Bd_Da_arg_2p.dat")
        func = load_file("Bd_Da_2p1.dat")
        cs = CubicSpline(arg, func)
        self.Bd_min = cs(self.stator.Da*1000.0)
        # Bd_max
        func = load_file("Bd_Da_2p2.dat")
        cs = CubicSpline(arg, func)
        self.Bd_max = cs(self.stator.Da*1000.0)
        # kE
        arg = load_file("kE_Da_arg_2p.dat")
        func = load_file("kE_Da_2p.dat")
        cs = CubicSpline(arg, func)
        self.kE = cs(self.stator.Da*1000.0)
        if self.h <= 0.25:
            self.stator.lamda_min = 0.5
            self.stator.lamda_max = 0.8
        else:
            self.stator.lamda_min = 0.4
            self.stator.lamda_max = 0.6
    if self.dp == 4:
        # A_min
        arg = load_file("A_Da_arg_4p.dat")
        func = load_file("A_Da_4p1.dat")
        cs = CubicSpline(arg, func)
        self.A_min = cs(self.stator.Da*1000.0)*1000.0

```

```

# A_max
func = load_file("A_Da_4p2.dat")
cs = CubicSpline(arg, func)
self.A_max = cs(self.stator.Da*1000.0)*1000.0
# Bd_min
arg = load_file("Bd_Da_arg_4p.dat")
func = load_file("Bd_Da_4p1.dat")
cs = CubicSpline(arg, func)
self.Bd_min = cs(self.stator.Da*1000.0)
# Bd_max
func = load_file("Bd_Da_4p2.dat")
cs = CubicSpline(arg, func)
self.Bd_max = cs(self.stator.Da*1000.0)
# kE
arg = load_file("kE_Da_arg_4p.dat")
func = load_file("kE_Da_4p.dat")
cs = CubicSpline(arg, func)
self.kE = cs(self.stator.Da*1000.0)
if self.h <= 0.25:
    self.stator.lamda_min = 0.8
    self.stator.lamda_max = 1.15
else:
    self.stator.lamda_min = 0.7
    self.stator.lamda_max = 0.8
if self.dp == 6:
    # A_min
    arg = load_file("A_Da_arg_6p.dat")
    func = load_file("A_Da_6p1.dat")
    cs = CubicSpline(arg, func)
    self.A_min = cs(self.stator.Da*1000.0)*1000.0
    # A_max
    func = load_file("A_Da_6p2.dat")
    cs = CubicSpline(arg, func)
    self.A_max = cs(self.stator.Da*1000.0)*1000.0
    # Bd_min
    arg = load_file("Bd_Da_arg_6p.dat")
    func = load_file("Bd_Da_6p1.dat")
    cs = CubicSpline(arg, func)
    self.Bd_min = cs(self.stator.Da*1000.0)
    # Bd_max
    func = load_file("Bd_Da_6p2.dat")
    cs = CubicSpline(arg, func)
    self.Bd_max = cs(self.stator.Da*1000.0)
    # kE
    arg = load_file("kE_Da_arg_6p.dat")
    func = load_file("kE_Da_6p.dat")
    cs = CubicSpline(arg, func)
    self.kE = cs(self.stator.Da*1000.0)
    if self.h <= 0.25:
        self.stator.lamda_min = 1.15
        self.stator.lamda_max = 1.5
    else:
        self.stator.lamda_min = 0.95
        self.stator.lamda_max = 1.15
if self.dp == 8:
    # A_min
    arg = load_file("A_Da_arg_8p.dat")
    func = load_file("A_Da_8p1.dat")
    cs = CubicSpline(arg, func)
    self.A_min = cs(self.stator.Da*1000.0)*1000.0
    # A_max
    func = load_file("A_Da_8p2.dat")
    cs = CubicSpline(arg, func)

```

```

self.A_max = cs(self.stator.Da*1000.0)*1000.0
# Bd_min
arg = load_file("Bd_Da_arg_8p.dat")
func = load_file("Bd_Da_8p1.dat")
cs = CubicSpline(arg, func)
self.Bd_min = cs(self.stator.Da*1000.0)
# Bd_max
func = load_file("Bd_Da_8p2.dat")
cs = CubicSpline(arg, func)
self.Bd_max = cs(self.stator.Da*1000.0)
# kE
arg = load_file("kE_Da_arg_8p.dat")
func = load_file("kE_Da_8p.dat")
cs = CubicSpline(arg, func)
self.kE = cs(self.stator.Da*1000.0)
if self.h <= 0.25:
    self.stator.lamda_min = 1.5
    self.stator.lamda_max = 2.05
else:
    self.stator.lamda_min = 1.2
    self.stator.lamda_max = 1.4
if self.dp == 10:
    # A_min
    arg = load_file("A_Da_arg_10p.dat")
    func = load_file("A_Da_10p1.dat")
    cs = CubicSpline(arg, func)
    self.A_min = cs(self.stator.Da*1000.0)*1000.0
    # A_max
    func = load_file("A_Da_10p2.dat")
    cs = CubicSpline(arg, func)
    self.A_max = cs(self.stator.Da*1000.0)*1000.0
    # Bd_min
    arg = load_file("Bd_Da_arg_10p.dat")
    func = load_file("Bd_Da_10p1.dat")
    cs = CubicSpline(arg, func)
    self.Bd_min = cs(self.stator.Da*1000.0)
    # Bd_max
    func = load_file("Bd_Da_10p2.dat")
    cs = CubicSpline(arg, func)
    self.Bd_max = cs(self.stator.Da*1000.0)
    # kE
    arg = load_file("kE_Da_arg_10p.dat")
    func = load_file("kE_Da_10p.dat")
    cs = CubicSpline(arg, func)
    self.kE = cs(self.stator.Da*1000.0)
    self.stator.lamda_min = 1.4
    self.stator.lamda_max = 1.7
if self.dp == 12:
    # A_min
    arg = load_file("A_Da_arg_12p.dat")
    func = load_file("A_Da_12p1.dat")
    cs = CubicSpline(arg, func)
    self.A_min = cs(self.stator.Da*1000.0)*1000.0
    # A_max
    func = load_file("A_Da_12p2.dat")
    cs = CubicSpline(arg, func)
    self.A_max = cs(self.stator.Da*1000.0)*1000.0
    # Bd_min
    arg = load_file("Bd_Da_arg_12p.dat")
    func = load_file("Bd_Da_12p1.dat")
    cs = CubicSpline(arg, func)
    self.Bd_min = cs(self.stator.Da*1000.0)
    # Bd_max

```

```

func = load_file("Bd_Da_12p2.dat")
cs = CubicSpline(arg, func)
self.Bd_max = cs(self.stator.Da*1000.0)
# kE
arg = load_file("kE_Da_arg_12p.dat")
func = load_file("kE_Da_12p.dat")
cs = CubicSpline(arg, func)
self.kE = cs(self.stator.Da*1000.0)
self.stator.lamda_min = 1.4
self.stator.lamda_max = 1.7

tau_min = math.pi*self.stator.D_min/self.dp
tau_max = math.pi*self.stator.D_max/self.dp
self.stator.ld_min = round(self.stator.lamda_min*tau_min, 3)
self.stator.ld_max = round(self.stator.lamda_max*tau_max, 3)

def find_lamda(self):
    self.P1 = self.Pn*self.kE/(self.kpd*self.cosFi)
    self.Iln = self.Pn/(3*self.UF*self.cosFi*self.kpd)
    self.stator.find_lamda(self.P1, self.omega, self.dp, self.A, self.Bd)

# Wire
def find_current_density(self, a):
    self.stator.winding.a = a
    self.stator.winding.select_a(self.stator.Z)
    self.A = 6 * self.Iln * self.stator.winding.W / (math.pi *
self.stator.D)
    self.Fi = self.kE * self.UF / (4 * self.kB * self.stator.winding.W *
self.stator.kobl * self.fl)
    self.Bd = self.p * self.Fi / (self.stator.D * self.stator.ld)
    # AJ
    arg = ""
    func = ""
    if self.h <= 0.132:
        arg = load_file("AJ_Da_arg1.dat")
        if self.dp == 2:
            func = load_file("AJ_Da_2p1.dat")
        else:
            func = load_file("AJ_Da_468p1.dat")
    elif 0.132 < self.h <= 0.25:
        arg = load_file("AJ_Da_arg2.dat")
        if self.dp == 2 or self.dp == 4:
            func = load_file("AJ_Da_24p2.dat")
        elif self.dp == 6:
            func = load_file("AJ_Da_6p2.dat")
        else:
            func = load_file("AJ_Da_8p2.dat")
    else:
        if self.dp == 2 or self.dp == 4:
            arg = load_file("AJ_Da_arg3_24p.dat")
            func = load_file("AJ_Da_24p3.dat")
        elif self.dp == 6 or self.dp == 8:
            arg = load_file("AJ_Da_arg3_68p.dat")
            func = load_file("AJ_Da_68p3.dat")
        else:
            arg = load_file("AJ_Da_arg3_1012p.dat")
            func = load_file("AJ_Da_1012p3.dat")

    cs = CubicSpline(arg, func)
    self.AJ1 = cs(self.stator.Da * 1000.0)*1e09
    self.stator.J = self.AJ1/self.A
    self.stator.winding.wire.qefl =
self.Iln/(self.stator.winding.a*self.stator.J)

```

```

def check_current_density(self):
    AJ = self.A*self.stator.J
    self.dAJ = round(AJ*100/self.AJ1 - 100, 2)
    if AJ <= self.AJ1:
        return True
    else:
        return False

def correct_Fi_Bd(self):
    self.Fi = self.kE * self.UF / (4.44 * self.stator.winding.W *
self.stator.kobl * self.fl)
    self.Bd = self.p * self.Fi / (self.stator.Da * self.stator.ld)

def magnetic_circuit(self, db):
    self.stator.magnetic_circuit(self.Bd, self.Fi, self.dp, db)
    self.rotor.magnetic_circuit(self.dp, db)
    gamma = (self.stator.slot.bsh / self.rotor.air_gap)**2 / (5 +
self.stator.slot.bsh / self.rotor.air_gap)
    self.kd = round(self.stator.tl / (self.stator.tl - gamma *
self.rotor.air_gap), 2)
    self.Fd = round(1.59e06 * self.Bd * self.kd * self.rotor.air_gap, 2)
    self.F_sum = self.Fd + self.stator.Fz + self.stator.Fa +
self.rotor.Fz + self.rotor.Fj
    self.kz = round(1 + (self.stator.Fz + self.rotor.Fz) / self.Fd, 2)
    self.k_mu = round(self.F_sum / self.Fd, 2)
    self.I_mu = round(self.p * self.F_sum / (0.9 * 3 *
self.stator.winding.W * self.stator.kobl), 2)
    self.I_mu_rel = round(self.I_mu / self.Iln, 2)

def base_motor_solve(self, db):
    try:
        self.magnetic_circuit(db)
        msgDialog("Project was solved successfully", Status.INFO)
    except Exception as ex:
        msgDialog("Error occurred in solve operation:\n\n" + str(ex),
Status.ERROR)

```

ДОДАТОК Д

СХЕМИ ЕЛЕКТРИЧНІ ПРИНЦИПОВІ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

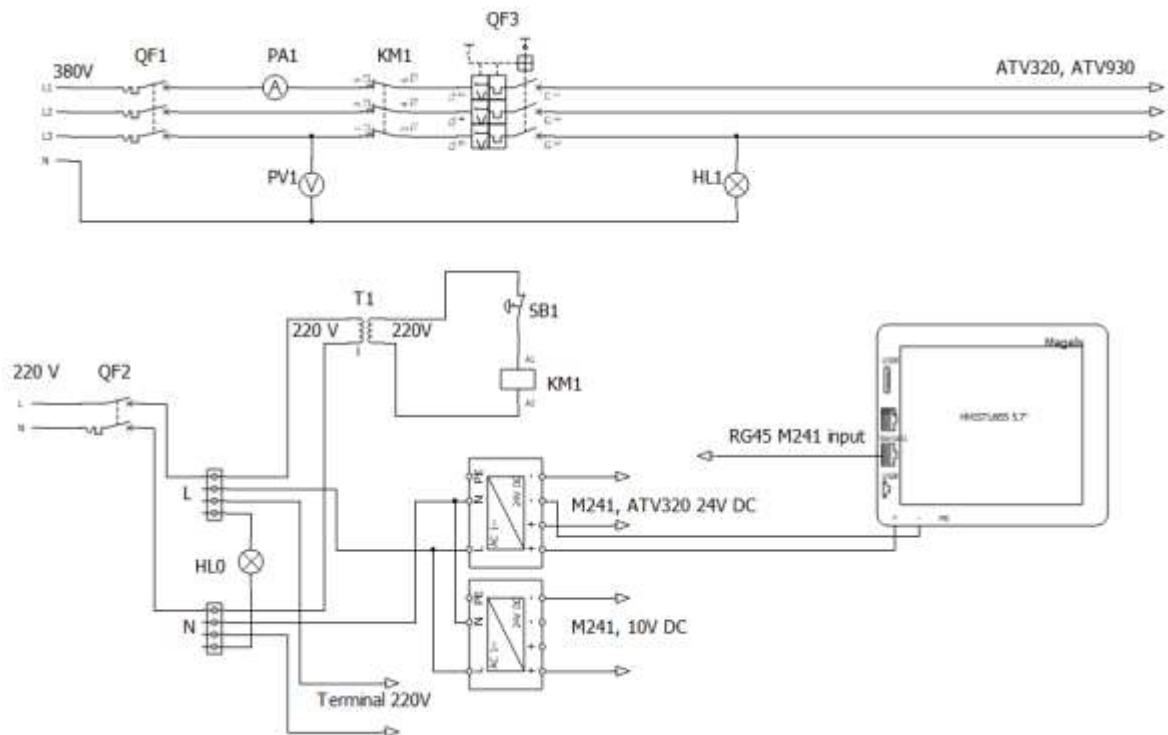


Рисунок Д.1 – Схема електрична принципова: мережа живлення

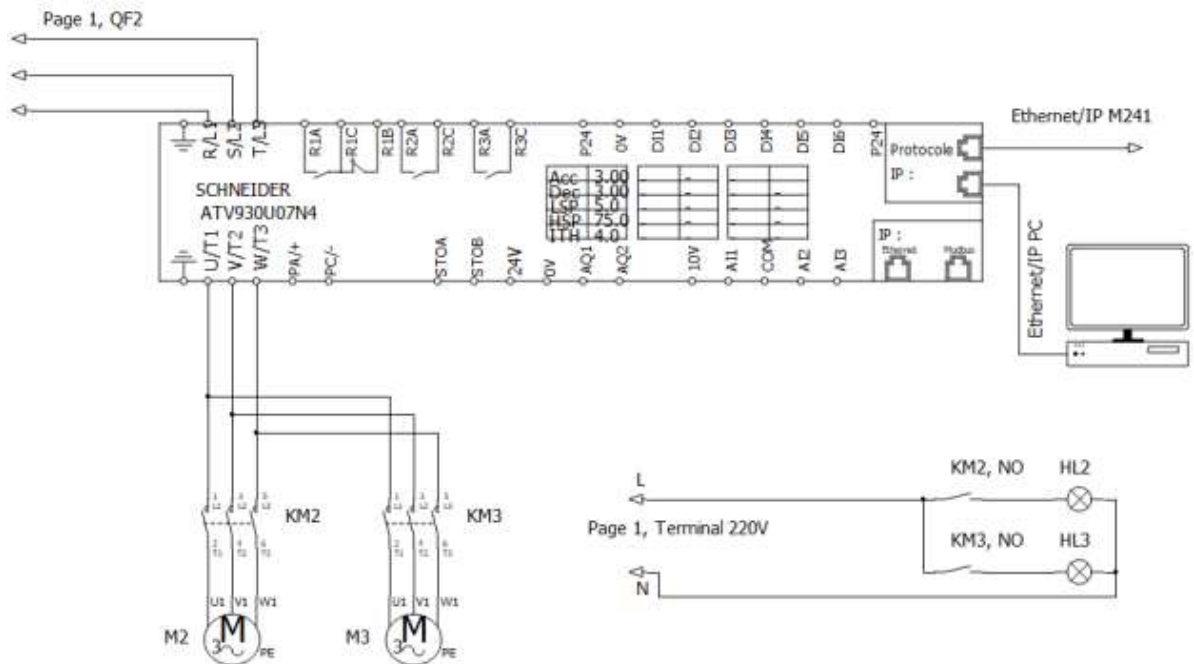


Рисунок Д.2 – Схема електрична принципова: механізм приводу двигуна шибера

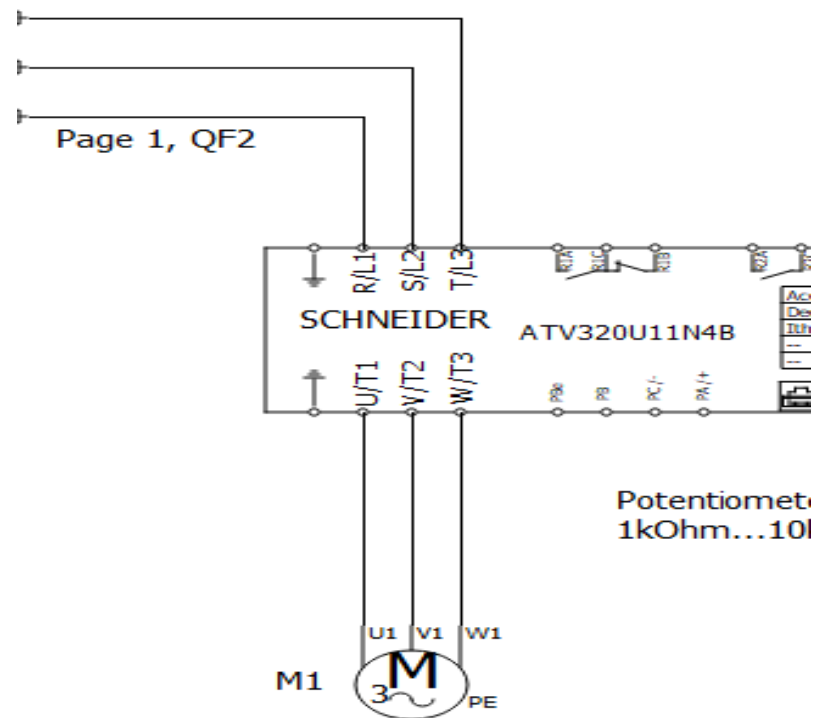


Рисунок Д.3 – Схема електрична принципова: механізм приводу двигуна вентилятора

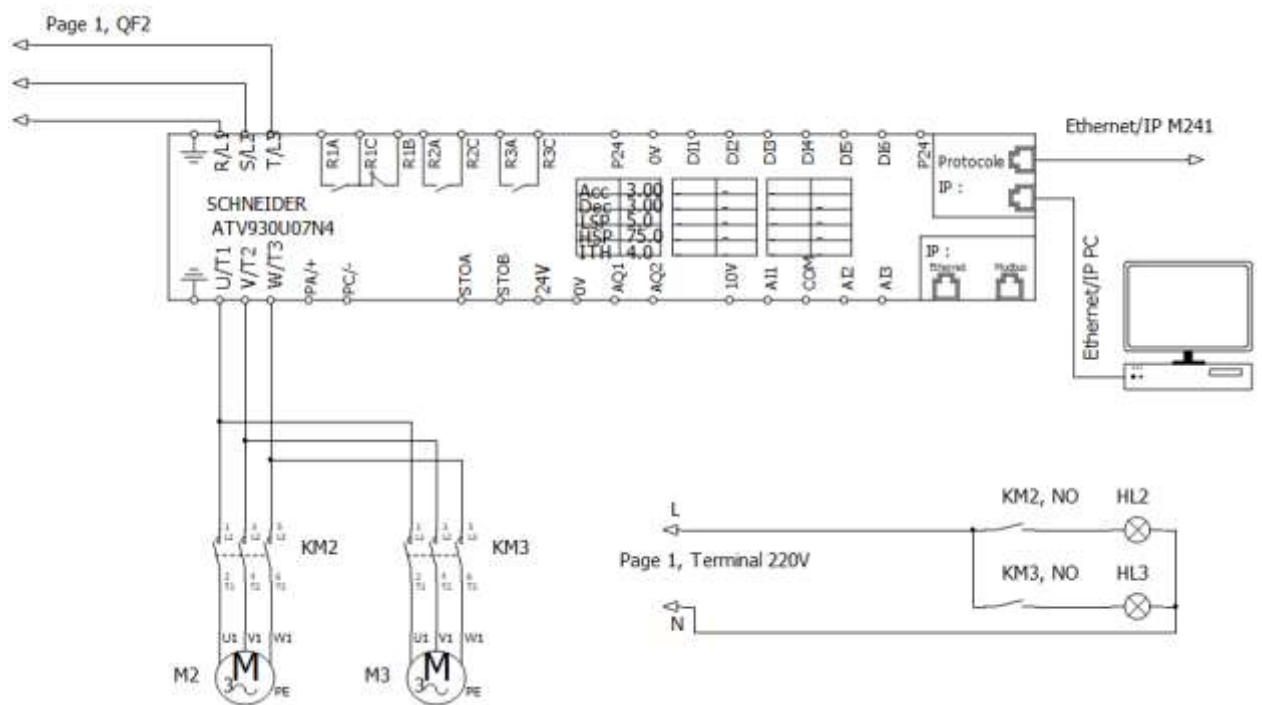


Рисунок Д.4 – Схема електрична принципова: механізми шибера і подавання палива

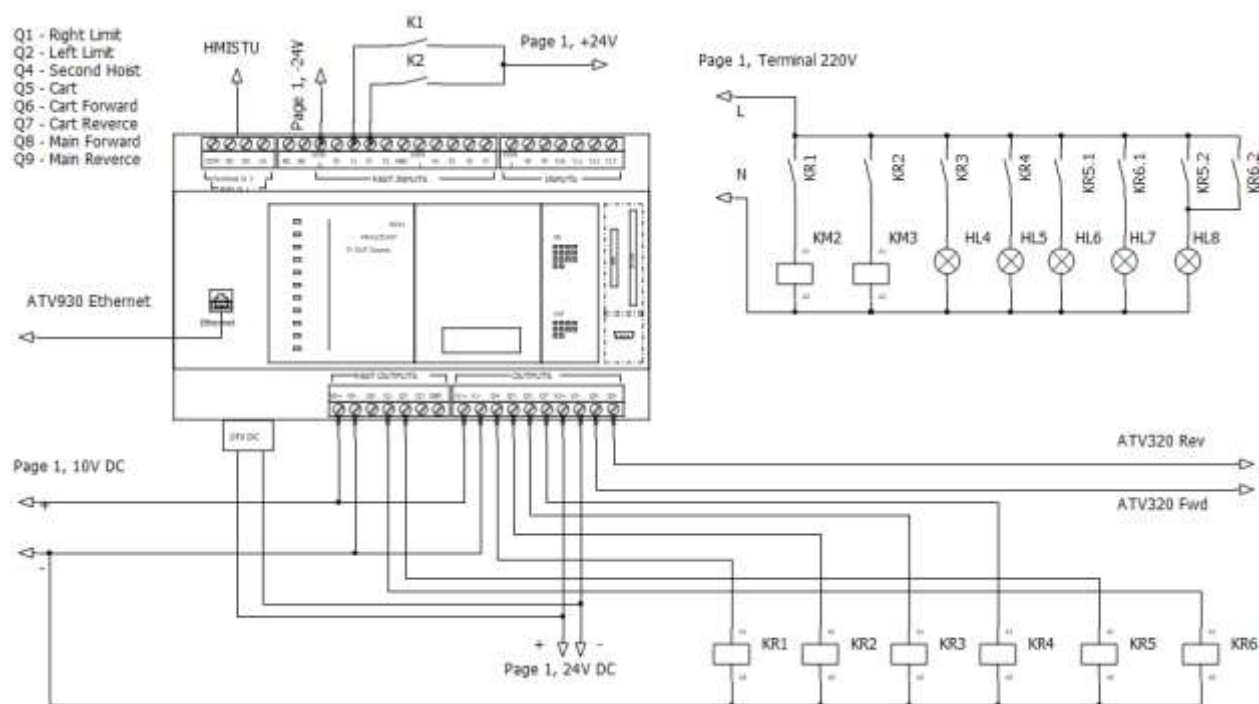


Рисунок Д.5 – Схема електрична принципова: контролер M241 та коло керування

ДОДАТОК Ж

АКТ ПРО ОТРИМАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор
ННІ Енергетичної, інформаційної та
транспортної інфраструктури ХНУМГ
ім. О.М. Бекетова

 Сергій ПЛАНКОВСЬКИЙ
« » 2026 р.

АКТ

про отримання експериментальних результатів дисертаційної роботи

Ми, що нижче підписалися, комісія у складі:

Плюгін В.Є. – д.т.н., проф., зав. каф. систем електропостачання та електроспоживання міст;

Шпіка М.І. – к.т.н., доц., заступник директора ННІ ЕІТІ;

Словіковський О.М. – аспірант Національного університету біоресурсів і природокористування України

склали цей акт про те, що експериментальні дослідження за темою дисертаційної роботи: «Інтелектуальна система керування сушильним агрегатом при виробництві цементних сумішей»

були виконані в сертифікованій лабораторії Schneider Electric електричного приводу та електричних апаратів, каф. систем електропостачання та електроспоживання міст Харківського національного університету міського господарства імені О.М. Бекетова.

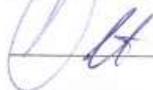
У процесі виконання досліджень було використано лабораторне обладнання, вимірювальні комплекси та програмно-апаратні засоби зазначеної лабораторії.

Отримані експериментальні результати є достовірними, відтворюваними та можуть бути використані у дисертаційній роботі відповідно до її мети та завдань.

Акт складено для подання за місцем вимоги.

Члени комісії:

 Владислав ПЛЮГІН

 Микола ШПІКА

Виконавець роботи:

 Олексій СЛОВІКОВСЬКИЙ